



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

TESIS DOCTORAL

**Tecnologías aplicadas para la caracterización y mejora
de la calidad y trazabilidad de la aceituna de mesa en
cosecha y postcosecha**

Technologies applied to characterise and improve the
quality and traceability of table olives at harvest and post-harvest

Autor

Sergio Bayano Tejero

Directores

Rafael Rubén Sola Guirado

Gregorio L. Blanco Roldán

Córdoba, junio de 2023

TITULO: *Tecnologías aplicadas para la caracterización y mejora de la calidad y trazabilidad de la aceituna de mesa en cosecha y postcosecha*

AUTOR: *Sergio Bayano Tejero*

© Edita: UCOPress. 2023
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:

Tecnologías aplicadas para la caracterización y mejora de la calidad y trazabilidad de la aceituna de mesa en cosecha y postcosecha.

DOCTORANDO/A:

Sergio Bayano Tejero

INFORME RAZONADO DE LOS DIRECTORES DE LA TESIS

Los directores de la presente Tesis Doctoral, Profesor Dr. Rafael Rubén Sola Guirado y Profesor Dr. Gregorio L. Blanco Roldán, emiten INFORME FAVORABLE para la lectura de la misma, subrayando el cumplimiento, por parte del Doctorando, de todos los objetivos y actividades marcados en el Plan de Investigación y el Plan de Formación elaborados dentro del Programa de Doctorado. Asimismo, se destaca que los resultados obtenidos permiten avalar la hipótesis de partida, habiéndose desarrollado en 2 Proyectos de Investigación y dando lugar a 3 publicaciones científicas indexadas según el Journal Citation Reports (JCR), cumpliendo los requisitos establecidos por la Universidad de Córdoba para la presentación de la Tesis Doctoral como compendio de artículos.

A continuación, se relacionan los proyectos citados y las publicaciones relacionadas con la Tesis.

1. Proyectos de Investigación:

- PYC20 RE 024. Desarrollo de una aplicación IoT de monitorización de la cosecha realizada por diferentes sistemas de recolección mecanizada en olivar tradicional para la mejora de su gestión y trazabilidad. Ayudas a proyectos de I+D+i en el Ámbito de Ecosistemas de Innovación de los Centros de Excelencia Internacional (CEI). Ayudas a la I+D+i, en el ámbito del Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación (PAIDI 2020). Junta de Andalucía.
- Proyecto INNOLIVAR - Compra Pública de Innovación en su modalidad de Compra Pública Precomercial (CPP). Convenio entre el 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.

2. Artículos científicos JCR (compendio de artículos que conforman la Tesis):

- Sola-Guirado, R. R., **Bayano-Tejero, S.**, Aragon-Rodriguez, F., Peña, A., & Blanco-Roldan, G. (2022). Bruising pattern of table olives ('Manzanilla' and 'Hojiblanca' cultivars) caused by hand-held machine harvesting methods. *Biosystems Engineering*, 215, 188-202. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01.010>

Indicios de calidad de la revista:

- a) ISSN: 1537-5110
- b) Índice de impacto: 5.002
- c) Año: 2022
- d) Categoría: Agriculture, multidisciplinary
- e) Posición: 8/59
- f) Cuartil: Q1
- g) Open Access

- **Bayano-Tejero, S.**, Karkee, M., Rodríguez-Lizana, A., & Sola-Guirado, R. R. (2023). Estimation of harvested fruit weight using volume measurements with distance sensors: A case study with olives in a *big box*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 205, 107620. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107620>

Indicios de calidad de la revista:

- a) ISSN: 0168-1699
- b) Índice de impacto: 6.817
- c) Año: 2023
- d) Categoría: Agriculture, multidisciplinary
- e) Posición: 3/57
- f) Cuartil: Q1
- g) Open Access

- **Bayano-Tejero, S.**, Martínez-Gila, D., Blanco-Roldán, G., & Sola-Guirado, R. R. (2023). Cleaning system, batch sorting and traceability between field-industry in the mechanical harvesting of table olives. *Postharvest Biology and Technology*, 199, 112278. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112278>

Indicios de calidad de la revista:

- a) ISSN: 0925-5214
- b) Índice de impacto: 6.751
- c) Año: 2023
- d) Categoría: Food science & technology
- e) Posición: 18/143
- f) Cuartil: Q1
- g) Open Access

Adicionalmente y, con anterioridad a la fecha de matriculación en el Programa de Doctorado, se publicó otro artículo científico relacionado con la línea de investigación de la Tesis, el cual se incluye como otro capítulo más de la misma.

- **Bayano-Tejero, S., Sola-Guirado, R. R., Gil-Ribes, J. A., & Blanco-Roldán, G. L. (2019).** Machine to machine connections for integral management of the olive production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166, 104980. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104980>

Indicios de calidad de la revista:

- a) ISSN: 0168-1699
- b) Índice de impacto: 6.757
- c) Año: 2019
- d) Categoría: Agriculture, multidisciplinary
- e) Posición: 4/59
- f) Cuartil: Q1

3. Comunicaciones en congresos, conferencias y simposios:

- **Bayano-Tejero, S; Blanco-Roldán, G. L.; Sola-Guirado, R. R.; Gil-Ribes, J. A. (2022).** Conexión del campo con la industria con máquinas de clasificación e integración de la trazabilidad integral de la aceituna. III Symposium Ibérico de Ingeniería Hortícola- Smart Farming 22. Sociedad Española de Ciencias hortícolas (SECH), Murcia.
- **Bayano-Tejero, S; Blanco-Roldán, G. L.; Pérez-Moya, J; Sola-Guirado, R. R.; Castro-García, S.; Gil-Ribes, J. A. (2022).** Avances en la estimación de la cosecha mediante cámaras de profundidad. III Symposium Ibérico de Ingeniería Hortícola- Smart Farming 22. Sociedad Española de Ciencias hortícolas (SECH), Murcia.
- **Bayano-Tejero, S; Blanco-Roldán, G. L.; Sola-Guirado, R. R; Gil-Ribes, J. A. (2022).** Batch management according to quality and traceability at field. Innolivar Project. 14th International FRUTIC Symposium 2022. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), Valencia.

4. Otras publicaciones:

Además de las publicaciones científicas derivadas del desarrollo de la tesis, se generaron otros trabajos relacionados anteriores:

- **Bayano-Tejero, S., Aragon-Rodriguez, F., Gil-Ribes, J., Blanco-Roldán, G. L., Castro-García, S., & Sola-Guirado, R. R. (2021).** Towards Integrated Mechanised Management of Olive Farms. *Agricultural Engineering AgEng2021*, 274.
- Gil-Ribes, J. A., Blanco-Roldan G., Sola-Guirado, R. R., **Bayano-Tejero, S.**, Pérez-Moya, J., Aragón-Rodríguez, F. (2021). CPP INNOLIVAR: Mecanización 4.0 en el Olivar. Sistema de trazabilidad iOlivetrack. *Óleo Revista*, 184, 20-23.
- **Bayano-Tejero, S.**, Aragón-Rodríguez, F; Pérez-Moya, J; Sola-Guirado, R. R.; Blanco-Roldan 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 (SECH).
- 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.,

Aragón-Rodríguez, 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>

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. Sergio Bayano Tejero, emitiéndose un juicio positivo.

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

Córdoba, 17 de junio de 2023

Firma de los directores

Fdo.: Rafael Rubén Sola Guirado

Fdo.: Gregorio L. Blanco Roldán

Agradecimientos

Agradecimientos

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que de una manera u otra han contribuido a la realización de esta Tesis Doctoral:

En primer lugar, a mis directores de tesis, D. Rafael Rubén Sola Guirado y D. Gregorio L. Blanco Roldán, por el tiempo invertido, los consejos ofrecidos y su ayuda para llevar a buen puerto todo el trabajo realizado.

A los compañeros de trabajo que he tenido a lo largo de este tiempo y miembros del Grupo de Investigación AGR-126, en especial, a D. Juan Pérez Moya por su inestimable apoyo y contribución a la consecución de los objetivos de este trabajo.

A D. Jesús Gil Ribes, por su incansable trabajo durante el tiempo compartido y por darme la oportunidad de comenzar en el mundo de la investigación.

Al resto de autores de los artículos científicos que conforman esta tesis, por su contribución y buen hacer que ha permitido conseguir unos magníficos resultados.

Dar las gracias también por la financiación recibida al Proyecto INNOLIVAR, - Compra Pública de Innovación en su modalidad de Compra Pública Precomercial (CPP), 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 también, al Proyecto PYC RE024 ‘Desarrollo de una aplicación IoT de monitorización de la cosecha realizada por diferentes sistemas de recolección mecanizada en olivar tradicional para la mejora de su gestión y trazabilidad’, financiado por la Consejería de Transformación Económica, Industria, Conocimiento y Universidades de la Junta de Andalucía.

Por último, a mi familia, por haber ‘sufrido’ mi dedicación a esta Tesis, pero mostrándome su apoyo incondicional y comprensión en todo momento.

**Tecnologías aplicadas para la
caracterización y mejora de la calidad y
trazabilidad de la aceituna de mesa en
cosecha y postcosecha**

Sergio Bayano Tejero
Tesis Doctoral

Índice de contenido

Resumen	24
Capítulo 1 Introducción y justificación	26
1. Introducción.....	27
2. Antecedentes.....	28
2.1 El olivar de mesa.....	28
2.2 Calidad en aceituna de mesa	30
2.3 Monitores de cosecha	33
2.4 Trazabilidad en aceituna de mesa	36
3. Justificación.....	39
Capítulo 2 Hipótesis y objetivos	42
1. Hipótesis inicial	43
2. Objetivos.....	43
Capítulo 3 Patrón de molestado en aceitunas de mesa (variedades 'Manzanilla' y 'Hojiblanca') causado por métodos de recolección manuales	46
1. Introducción.....	47
2. Materiales y métodos.....	48
2.1 Obtención de imágenes para caracterizar las aceitunas.....	48
2.2 Tratamientos de recolección de árboles y muestras de aceituna	48
2.3 Caracterización de las aceitunas y sus daños externos.....	50
3. Resultados	52
3.1 Caracterización del tamaño y forma de los frutos molestados	52
3.2 Evaluación de la firmeza.....	53
3.3 Caracterización del color del fruto y del molestado.....	54
3.4 Caracterización del índice de molestado	55
4. Discusión.....	59
Capítulo 4 Estimación del peso del fruto recolectado mediante sensores de medición de distancia por volumen ocupado: Un caso de estudio con aceitunas almacenadas en big box	64
1. Introducción.....	65
2. Materiales y métodos.....	65
2.1 Estructura del sistema de almacenamiento	65
2.2 Estimación del volumen de fruto recolectado	66
2.3 Elementos auxiliares	68
2.4 Estimación del peso a partir del volumen medido	68

2.5	Ensayo de caracterización y evaluación de la medición de la distancia.....	69
3.	Resultados	72
3.1	Obtención del campo de visión de ambos sistemas	72
3.2	Obtención de la exactitud y repetibilidad de ambos sistemas (distancia y volumen) 73	
3.3	Influencia de la superficie interceptada en la exactitud de las mediciones (sólo sistema experimental).....	75
3.4	Influencia del color y la reflectividad de la superficie medida en la exactitud de la medición	75
3.5	Influencia de la iluminación ambiental en la exactitud de las mediciones	76
3.6	Error de estimación del peso obtenido e influencia de la zona de llenado	76
3.7	Obtención del error de peso estimado con cambios de aceleración durante el tránsito por un recorrido irregular.....	77
4.	Discusión.....	78
Capítulo 5 Conexiones máquina a máquina para la gestión integral de la producción de aceitunas.....		84
1.	Introducción.....	85
2.	Materiales y métodos.....	85
2.1	Dispositivo electrónico ‘iOlivetrack-D’	85
2.2	Aplicación web "iOlivetrack-W"	87
2.3	Gestión de la comunicación entre "iOlivetrack-D" e "iOlivetrack-W.....	88
2.4	Metodología de trabajo.....	89
2.5	Evaluación de "iOlivetrack-D" e "iOlivetrack-W.....	93
3.	Resultados	95
4.	Discusión.....	97
Capítulo 6 Sistema de limpieza, clasificación por lotes y trazabilidad entre campo e industria en la recolección mecanizada de aceituna de mesa.....		101
1.	Introducción.....	102
2.	Materiales y métodos.....	103
2.1	Hardware.....	103
2.2	Software.....	105
2.3	Metodología	110
3.	Resultados	115
3.1	Pruebas de laboratorio	115
3.2	Ensayos en campo.....	115
4.	Discusión.....	119
Capítulo 7 Conclusiones.....		125
Referencias.....		131

Anexos.....	144
Anexo I_Bruising pattern of table olives ('Manzanilla'and 'Hojiblanca'cultivars) caused by hand-held machine harvesting methods.....	146
Anexo II_Estimation of harvested fruit weight using volume measurements with distance sensors: A case study with olives in a big box.....	163
Anexo III_Machine to machine connections for integral management of the olive production	177
Anexo IV_Cleaning system, batch sorting and traceability between field-industry in the mechanical harvesting of table olives.....	191

Índice de figuras

Figura 1. Distribución de la superficie de olivar respecto de la superficie geográfica (ESYRCE, 2019).....	28
Figura 2. Métodos de recolección de la aceituna de mesa. Recolección mediante ordeño del árbol (izquierda) y recolección mecanizada con vibrador de troncos apoyo mediante sistemas semi-mecanizados (derecha) (Gil-Ribes et al., 2017).....	30
Figura 3. Escala usada comúnmente para la evaluación del índice de madurez del fruto (Montaño et al., 2018).....	31
Figura 4. Algoritmo propuesto por Sola-Guirado et al., (2020a) para evaluación de la calidad del fruto.....	31
Figura 5. Limpieza de la aceituna de mesa e inmersión en líquido para transporte a industria... 33	
Figura 6. Sistemas de clasificación de calidad de aceituna de mesa en la industria (Mutliscan Technologies, 2023).....	33
Figura 7. Mapa de rendimiento proporcionado por un monitor de cosecha de una cosechadora de grano (Aspexit, 2020).....	34
Figura 8. Cosechadora cabalgante para olivar superintensivo. Detalle de descarga de tolvas de almacenamiento del fruto en remolque (arriba). Sistema de monitorización de rendimiento (abajo) (New Holland, 2023).....	36
Figura 9. Principales productores mundiales de aceituna de mesa. Media de campañas 2015-2020 (ASEMESA, 2023).....	39
Figura 10. Relación entre los objetivos específicos de la Tesis Doctoral y la fase de campo que abarcan.....	43
Figura 11. Patrón de molestado característico en aceituna de mesa variedad ‘Manzanilla’ y ‘Hojiblanca’ para los sistemas de recolección estudiados	47
Figura 12. Bandeja con fruto impactado y secuencia del impacto provocado por la caída libre de la bola.....	49
Figura 13. Dispositivo desarrollado para girar las aceitunas y tomar imágenes en 360°.....	51
Figura 14. Proceso realizado para la representación de toda la superficie de una aceituna a partir de las 24 fotos de un fruto con giros de 15°	51
Figura 15. Evolución del color (R) durante la maduración de la aceituna de mesa a lo largo de la campaña de recolección (mediana de los valores en espacio RGB para Hojiblanca y Manzanilla). (Para la interpretación de las referencias al color en la leyenda de esta figura, se remite al lector a la versión web de este artículo).....	55
Figura 16. Índice de molestado para cada método de derribo de frutos (M: manual a mano, BS: vibrador de ramas, SC: sacudidor de ramas, B: vareo manual) e intercepción (N: fardo, P:	

acolchado) y para cada variedad de aceituna. Los valores indicados representan la mediana y el rango intercuartílico (Kruskal-Wallis, $p < 0,05$; prueba de suma de rangos de Wilcoxon post hoc con método de ajuste de Holm, $p < 0,05$).....	56
Figura 17. Distribución de los valores del molestado. Las líneas de puntos verticales delimitan cada categoría de daños	56
Figura 18. Frecuencia de la categoría de daños para cada tratamiento de derribo de frutos (M: manual a mano, BS: vibrador de ramas, SC: sacudidor de ramas, B: vareo manual) e interceptación (N: fardo, P: acolchado) y para cada variedad de olivo. Una letra diferente indica diferencias significativas entre tratamientos en la misma categoría de daños (prueba Z de proporciones por pares de dos muestras con método de ajuste de Holm, $p < 0.05$).....	57
Figura 19. Evolución temporal del color del molestado en el espacio de color RGB tras el impacto para las variedades 'Hojiblanca' (gris) y 'Manzanilla' (blanco) medida a partir de las imágenes	57
Figura 20. Evolución temporal del color de las magulladuras en el espacio de color RGB, tras el impacto, para las variedades "Hojiblanca" (izquierda) y "Manzanilla" (derecha), medido a partir de las imágenes. Los puntos indican los valores medios y las líneas superior e inferior indican la desviación estándar.....	58
Figura 21. Variación relativa del molestado para cada tratamiento de derribo del fruto (M: manual a mano, BS: vibrador de ramas, SC: sacudidor de ramas, B: vareo manual) e interceptación (N: fardo, P: acolchado) entre un fruto evaluado parcialmente (gris) y el fruto completo (blanco). El molestado parcial se fijó en el 100%. Letras distintas indican diferencias dentro del mismo tratamiento entre las distintas superficies observadas (prueba de suma de rangos de Wilcoxon Mann-Whitney, $p < 0.05$).....	58
Figura 22. Metodología expuesta para la estimación del peso mediante un monitor de rendimiento basado en sensores ToF	65
Figura 23. Estructura del sistema comercial montado en el tractor para la instalación de los sistemas de medida y elementos auxiliares. 1.-Luxómetro, 2.-Big box, 3.-Acelerómetro, 4.-Microcontrolador, 5.- GNSS, 6.-Célula de carga.....	66
Figura 24. Prototipo de monitor de rendimiento desarrollado con el sistema comercial sobre una estructura metálica y big box para almacenar el fruto (izquierda). Detalle de la cámara 3D (derecha).....	67
Figura 25. Prototipo de monitor de rendimiento desarrollado con el sistema experimental sobre una estructura metálica y un big box para almacenar el fruto (izquierda). Detalle del conjunto de sensores ToF (derecha).	67
Figura 26. Algoritmo aplicado para el cálculo de volúmenes en el sistema experimental. No se han representado todos los puntos auxiliares y polinomios calculados. El paso 1 corresponde al	

cálculo de los polinomios en ambos ejes para generar los puntos auxiliares. El paso 2 representa los prismas de cada punto (sensor y medidas auxiliares) para el cálculo del volumen total.	69
Figura 27. Campo de visión del sistema experimental (izquierda) y del sistema comercial (derecha). El origen de las coordenadas XY corresponde a la posición del sensor para cada sistema	72
Figura 28. Error relativo (%) en la distancia para el sistema comercial en diferentes posiciones desde una pared antes de las correcciones de la cámara 3D. Cada píxel corresponde a una medición en el FoV de la cámara 3D (1024 píxeles)	73
Figura 29. Error relativo en la distancia a diferentes posiciones de una pared para el sistema experimental (izquierda) y para el sistema comercial con correcciones (derecha). La banda gris delimita los límites de incertidumbre debidos a las 10 medidas.....	74
Figura 30. Volumen real frente a volumen estimado en el big box para el sistema experimental (izquierda) y el sistema comercial (derecha). Cada punto corresponde a la medición de volumen realizada con cada aumento de altura de la superficie utilizada.	74
Figura 31. Error relativo en la distancia (derecha) con diferentes superficies de área interceptadas por el FoV de un sensor ToF (izquierda). El área acumulada corresponde a la adición de los distintos círculos	75
Figura 32. Errores relativos en la distancia medida utilizando los sistemas experimental y comercial para objetivos de diferentes colores y acabado superficial.....	76
Figura 33. Error absoluto en volumen con diferentes niveles de iluminación para el sistema experimental (izquierda) y el sistema comercial (derecha). La línea negra indica la correlación lineal.	76
Figura 34. Peso estimado para dos repeticiones (1,2) por llenado central (CE), de esquina (CO) o lateral (SI) para el sistema experimental (izquierda) y el sistema comercial (derecha). La línea negra indica el peso real (RW). La banda gris alrededor de la línea de peso real delimita los límites de incertidumbre debidos a las diferentes repeticiones.....	77
Figura 35. Ruta GPS registrada por un tractor con los sistemas durante el tránsito por el recorrido irregular (arriba) y aceleración RMS medida durante la prueba (abajo)	77
Figura 36. Peso estimado (línea naranja) para el sistema experimental (izquierda) y el sistema comercial (derecha). La línea roja y la línea azul indican el peso real transportado y el peso medido por las células de carga, respectivamente	78
Figura 37. Variación del error relativo del peso teniendo en cuenta la carga transportada durante la prueba dinámica para diferentes sistemas.....	78
Figura 38. Metodología y sistemas desarrollados para la gestión integral de la trazabilidad desde el campo hasta la industria	85
Figura 39. Dispositivo electrónico iOlivetrack-D y sus componentes.	86

Figura 40. Interfaz de la aplicación web iOlivetrack-W en modo de usuario administrador. A: Área de campo, B: Área de industria, C: Área de gestión de usuarios, D: Opciones de filtros, E: Representación de datos, 1: Opciones de consulta, 2: Opciones de edición.	87
Figura 41. Interfaz HMI utilizada para establecer la configuración que se aplicará en el campo. Ejemplo de opciones disponibles (derecha)	89
Figura 42. Identificación de sectores mediante tecnología RFID y carga de datos en el servidor.	90
Figura 43. Identificación de sectores mediante tecnología GPS y carga de datos en el servidor.	90
Figura 44. Interfaz HMI, pantalla de recolección, utilizada en la recolección, el almacenamiento y el etiquetado de partidas.....	91
Figura 45. Etiquetado de partidas de fruto recolectado y carga de datos.....	92
Figura 46. Carga de datos a nivel de industria y acceso del consumidor a la información del lote.	92
Figura 47. Parcela, sectores y poste RFID probados para la gestión integral de datos en una explotación de olivar	93
Figura 48. Prueba realizada con iOlivetrack-D a bordo de la maquinaria para cargar los datos de campo en iOlivetrack-W. Ejemplo de identificación de sectores mediante la opción RFID	94
Figura 49. Registro de una operación de cosecha mediante GPS.	95
Figura 50. Operación de etiquetado y transporte de partidas de fruto.....	95
Figura 51. Código QR generado en la industria.....	97
Figura 52. Metodología para gestión de la calidad y trazabilidad en campo	103
Figura 53. Remolque TRCS para las operaciones de recepción, limpieza y clasificación y remolque TST para el almacenamiento y el transporte a la industria. Las flechas indican el flujo de fruto sin clasificar y el flujo de cada calidad, A y B.	104
Figura 54. Interconexión electrónica de los diferentes elementos entre ambos remolques, TRCS y TST.....	105
Figura 55. Diagrama de flujo para el algoritmo de clasificación.....	108
Figura 56. Interfaz de la aplicación desarrollada para el control de la clasificación de los lotes de fruto	109
Figura 57. Interfaz de la aplicación desarrollada para el control de la trazabilidad de los lotes de fruto.....	110
Figura 58. Metodología propuesta para el registro de la trazabilidad y calidad de los lotes de fruto	111
Figura 59. Prototipo en campo preparado para la realización de los ensayos	112

Figura 60. Índices y categorías de clasificación empleadas para el molesto (arriba) y madurez (abajo).....	114
Figura 61. Resultados del ensayo en laboratorio para las diferentes áreas de aceitunas artificiales (izquierda), diferentes índices de madurez simulados (centro) y para diferentes índices de molesto y posicionamiento de las manchas del fruto.....	115
Figura 62. Histogramas de los diámetros mayor (arriba) y menor (abajo) de las aceitunas que salen por la perdigonera (negro) y por la cinta de salida de calidad 'A' (gris).....	116
Figura 63. Resultados de clasificación en función del índice de madurez del fruto en la entrada (diagrama de sectores a la izquierda) para las salidas de calidad A y B (diagramas de sectores a la derecha).....	116
Figura 64. Molesto infringido por el prototipo en diferentes puntos de muestreo mediante aceituna recolectada a ordeño. gm_in y gm_out indican los puntos de muestreo a la entrada y salida de la perdigonera, respectivamente. dest_in y des_out indican los puntos de muestreo a la entrada y salida de la despalilladora, respectivamente. A_out es el punto de muestreo en la cinta de salida de fruto de calidad 'A'.....	117
Figura 65. Resultados de clasificación en función del molesto del fruto en la entrada (diagrama de sectores a la izquierda) para las salidas de calidad A y B (diagramas de sectores a la derecha)	118
Figura 66. Entrada de fruto en la tolva (izquierda) y salida de calidad 'A' (centro) y 'B' (derecha)	118
Figura 67. Ejemplo de información registrada en la aplicación web para un lote	119

Índice de tablas

Tabla 1. Relación entre los artículos científicos, objetivos específicos y capítulos de la Tesis Doctoral.....	44
Tabla 2. Parámetros de vibración medidos en las ramas con fruto mediante los sistemas de recolección	49
Tabla 3. Valores de tamaño y forma de los frutos medidos en dos campañas de recolección según el método de derribo con interceptación acolchada y variedad de aceituna.....	52
Tabla 4. Valores de tamaño y forma de la mancha de molestado del fruto medidos en dos temporadas de recolección según el método de derribo e interceptación y la variedad de aceituna	53
Tabla 5. Espacio de color CIELAB medido con el colorímetro en muestras de frutos impactados con el método de energía controlada (H) y los recolectados con los métodos de vibrador de ramas, sacudidor de ramas y vareo mediante acolchado en la interceptación	55
Tabla 6. Coordenadas en el espacio de color CIELAB para los objetivos usados.....	71
Tabla 7. Principales operaciones y datos realizados en la prueba de campo con iOlivetrack -D.	94
Tabla 8. Características de las aceitunas artificiales.....	111
Tabla 9. Características del molestado realizado a las aceitunas artificiales.....	112

Índice de abreviaturas

BI: Bruise Index

CAN: Controller Area Network

CSV: Comma Separated Values

EPC: Electronic Product Code

FIFO: First Input First Output

FoV: Field of View

GIS: Geographic Information System

GNSS: Global Navigation Satellite System

GPS: Global Positioning System

HMI: Human Machine Interface

IDW: Inverse Distance Weighting

LED: Light Emitting Diode

LiDAR: Light Detection And Ranging

M2M: Machine Two Machine

MEMS: Micro Electro Mechanical Systems

NMEA: National Marine Electronics Association

MI: Maturity Index

PC: Personal Computer

PLC: Programmable Logic Controller

QR: Quick Response

RFID: Radio Frequency Identification

RAM: Random Access Memory

RMS: Root Mean Square

RTC: Real Time Clock

RTK: Real Time Kinematics

SIGPAC: Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas

ToF: Time of Flight

TRCS: Trailer for Reception, Cleaning and Sorting

TST: Trailer for Storage and Transport

UHF: Ultra High Frequency

URL: Uniform Resource Locator

USB: Universal Serial Port

XML: eXtensible Markup Language

Resumen

La presente tesis doctoral aborda el estudio de las nuevas tecnologías para su aplicación a la mejora de la calidad y trazabilidad de la aceituna de mesa en la operación de cosecha y postcosecha. Se presenta un estudio donde se analizan medios de recolección y recepción habituales respecto de la caracterización del molesto que generan al fruto. Además, se expone una solución para el análisis del molesto del fruto en toda su superficie. Seguidamente se propone un monitor de rendimiento desarrollado mediante tecnología Time of Flight (ToF) para la estimación del peso del fruto cosechado y almacenado a partir del volumen ocupado por este. El monitor de rendimiento expuesto es comparado respecto de los sistemas de pesado actuales basados en células de carga. Otro tema tratado es la realización de lotes de fruto de una calidad determinada a pie de campo mediante un prototipo desarrollado basado en un remolque que integra funciones de limpieza y clasificación de fruto. En esta última operación se realiza la evaluación de parámetros de molesto, calibre y grado de madurez mediante análisis de imágenes. Estos lotes serán almacenados en líquido si tienen la calidad adecuada y enviados a la industria para mesa o, en seco, si son destinados a la extracción de aceite. En el trabajo se expone el desarrollo de este remolque y su evaluación en condiciones de campo. Por último, también se indica la metodología seguida para digitalizar todo el proceso de cosecha y postcosecha llevado a cabo, registrando en la nube lotes de fruto con la trazabilidad asociada, que contiene tanto las operaciones anteriores a la recolección como las posteriores hasta la entrega en la industria, así como la propuesta de estructura de la información en la nube para continuar dentro de esta hasta llegar al consumidor. Las tecnologías y gestión de la información necesarias son expuestas junto a los resultados de su puesta en funcionamiento.

Se ha establecido un patrón característico de molesto atribuible a cada medio de recolección, así como la mejora de la calidad del fruto mediante medidas correctoras en cuanto a la recepción del fruto con superficies acolchadas obteniéndose que el sacudidor de ramas es el método de recolección más agresivo con recepción sobre fardo. Adicionalmente, se puede estimar el molesto real del fruto evaluando parcialmente el fruto y aplicando un factor de corrección. Por otro lado, se han desarrollado monitores de rendimiento basados en sensores ToF que pueden ser una alternativa a las células de carga ya que ofrecen una buena exactitud y son más estables para la evaluación en dinámico del peso de fruto transportado. Por el contrario, factores como la iluminación ambiental y los colores pueden afectar al cálculo del peso. Además, requieren de una configuración adaptada a la geometría del sistema de almacenamiento del fruto. Finalmente, es posible realizar una limpieza y clasificación del fruto en campo que permita realizar lotes de una calidad determinada para enviarlo directamente desde el campo a las industrias de procesamiento para mesa y extracción de aceite, según la calidad evaluada. Así mismo, toda la trazabilidad asociada a los lotes (anterior y posterior a la recolección) puede centralizarse en una plataforma cloud y gestionarse para digitalizar toda la fase productiva en campo. Para ello es necesaria la adopción de tecnologías como RFID, GNSS, IoT, cloud computing y técnicas de procesamiento de imágenes

Palabras clave: aceituna de mesa, postcosecha, calidad, trazabilidad, molesto, mecanización.

Capítulo 1

Introducción y justificación

1. Introducción

En la actualidad, se están produciendo una serie de hechos que van a condicionar, enormemente, el desarrollo de la actividad agraria en las próximas décadas, entre los que se destacan:

1. El aumento de la población mundial. Se estima que vaya creciendo progresivamente hasta alcanzar los 9.000-11.000 millones de habitantes para 2050 (Fróna et al., 2019), lo que implicará que la superficie de suelo agrícola disponible para su uso en la producción de alimentos sea cada vez menor.
2. La escasez de mano de obra para trabajar en el campo y la despoblación de las zonas rurales (Vasconez et al., 2019). El campo se está convirtiendo en un entorno de trabajo no deseable debido a las, tradicionalmente conocidas, duras condiciones de trabajo, así como al escaso atractivo para los jóvenes, en lo que influye, significativamente, la escasa digitalización y la limitada conectividad existente en las zonas rurales, suponiendo el desplazamiento de esta población hacia zonas urbanas (Fassakhova et al., 2020).
3. Las políticas agrarias a nivel europeo. La agricultura en España, al igual que en el resto de los países de la Unión Europea, está condicionada por la llamada Política Agraria Común (PAC), cuya nueva redacción se aplicará de 2023 a 2027, pasando de ser una política basada en la descripción de los requisitos que deben cumplir los beneficiarios finales de las ayudas a ser una política orientada a la consecución de resultados concretos, vinculados a objetivos, generales y específicos, basados en los tres pilares de la sostenibilidad: económico, medioambiental y social. En este sentido, se potencian varios aspectos: la eficiencia en el uso de insumos, la disminución de productos fitosanitarios empleados y el ajuste de las dosis aplicadas, la optimización en el uso del agua, la promoción de la calidad y seguridad alimentaria y, en definitiva, la reducción del impacto ambiental de la agricultura (García-Azcarate, 2022).

Todo lo expuesto anteriormente, supondrá el tener que afrontar nuevos retos con acciones concretas. Por un lado, intensificando la producción, es decir, incrementar el número de plantas por hectárea, así como maximizar la producción, sacando el mayor rendimiento posible al suelo (Kopittke et al., 2019). Por otro lado, mejorando la mecanización y gestión de los cultivos. Para ello, se requiere la tecnificación y digitalización de las diferentes operaciones que se llevan a cabo en el campo (Fielke et al., 2020). El uso de maquinaria avanzada tecnológicamente permitirá realizar las operaciones de forma más eficiente en cuanto a recursos empleados, mejorando las condiciones de trabajo de los operarios y haciendo más atractivo el trabajo en el campo (Saiz-Rubio and Rovira-Más, 2020).

Además, las directivas europeas y la legislación existente en este ámbito exigen conseguir unos altos requisitos de calidad y mantener un estricto control de la trazabilidad debido a la globalización en el comercio de alimentos (Reglamento CE 178/2002, 2008). Esto ha incrementado la necesidad de contar con sistemas de trazabilidad de los productos, tanto para cumplir con la legislación vigente como por la búsqueda de la seguridad y calidad alimentaria (Aung and Chang, 2014), ya que, en los últimos años, los consumidores también han evolucionado y se han vuelto más exigentes en estas materias, valorando positivamente la transparencia recibida (Qian et al., 2020).

Por último, hay que subrayar que el avance en la investigación e innovación en la agricultura y, especialmente, en la calidad y trazabilidad agroalimentaria es una necesidad imperante. En el ámbito de las operaciones mecanizadas, la incorporación de las tecnologías

adecuadas para la realización de cada una de las tareas del cultivo y la digitalización de las mismas ayudará a mejorar estos aspectos, incrementando la rentabilidad de las explotaciones (Aiello et al., 2015). Del mismo modo, su integración en los modelos de explotación actuales garantiza una sostenibilidad a largo plazo de los cultivos para hacer frente a los desafíos actuales y futuros (Yang et al., 2018).

2. Antecedentes

2.1 El olivar de mesa

El cultivo del olivo (*Olea europaea L.*) resulta de enorme importancia a nivel mundial por las fuertes implicaciones tradicionales, culturales, paisajísticas y económicas que supone para los países en los que está presente, fundamentalmente, pertenecientes a la Cuenca Mediterránea, gozando actualmente de un crecimiento sostenido en dichos países, e implantándose en otros muchos donde no existía, lo cual le lleva a alcanzar 10,8 Mha (Mairech et al., 2020). En cuanto a España, la superficie de olivar español representa en torno al 23% del total mundial. A nivel nacional es el principal cultivo leñoso, concentrándose en Andalucía el 60.5% de la superficie nacional cultivada (ESYRCE, 2019). En esta comunidad el olivar representa el 46.7% de las tierras de cultivo, siendo Jaén y Córdoba con un 43.93% y 27.16%, respectivamente, las provincias con mayor superficie (Figura 1). Por ello, para muchas poblaciones, el olivar es la principal actividad económica generadora de riqueza, fundamentalmente, por el gran volumen de mano de obra empleada, no existiendo otros sectores capaces de generarla.

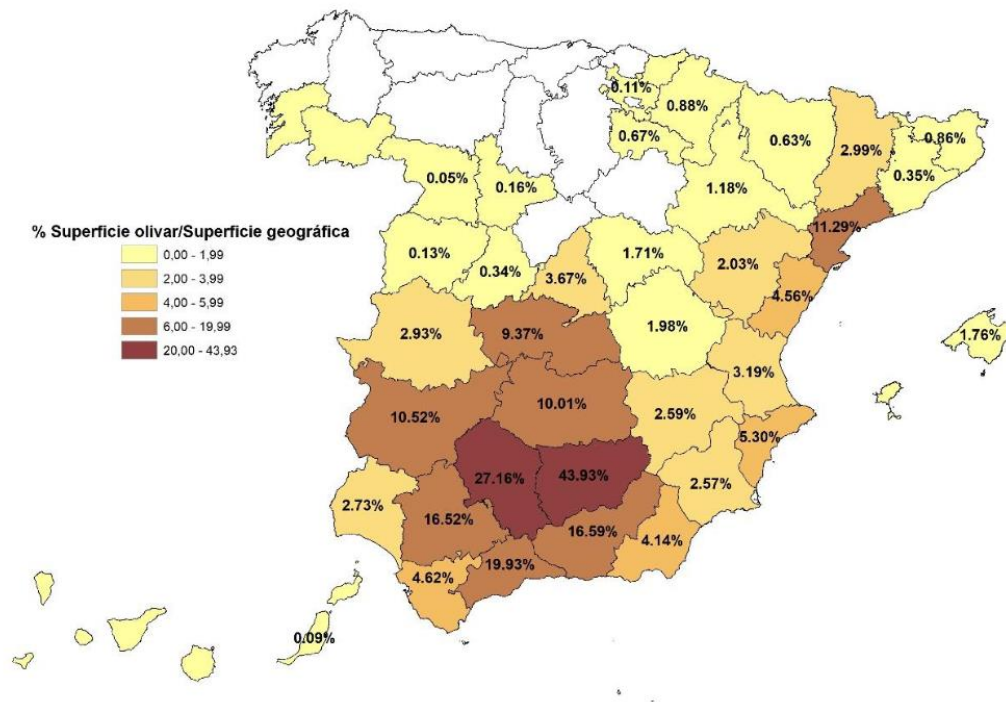


Figura 1. Distribución de la superficie de olivar respecto de la superficie geográfica (ESYRCE, 2019)

Dentro del olivar, hay que distinguir entre el olivar destinado a aceite y el destinado a aceituna de mesa, así como aquellos que tienen doble aptitud, lo que indica que pueden dedicarse a la obtención de un producto u otro en función de la demanda, precio de mercado, etc. El olivar de mesa presenta ciertas peculiaridades y dificultades respecto de su homólogo para aceite. Su principal diferencia respecto del anterior es el período de recolección debido al estado de

maduración del fruto. La recolección tiene lugar principalmente entre los meses de septiembre y octubre, un período notablemente más corto que el de aceite, cuya duración suele oscilar entre los 3-4 meses, dependiendo de la zona geográfica. El hecho de adelantar el período de recolección para conseguir que el fruto esté verde hace que su pedúnculo tenga mayor fuerza de retención con la consiguiente dificultad que implica para su derribo (Castillo-Ruiz et al., 2018).

En cuanto a variedades, no todas son aptas para su comercialización como aceituna de mesa y para ello deben cumplir con unas características organolépticas adecuadas (“Norma del CODEX para las aceitunas de mesa. CODEX STAN 66,” 2013), por tanto, su número se reduce prácticamente a 3 variedades, contrastando con la mayor amplitud que se registra para aceite. Así, las variedades de mesa más representativas son la ‘Manzanilla de Sevilla’, ‘Gordal’ y ‘Hojiblanca’ debido a su buena relación pulpa/hueso, su susceptibilidad a los daños por la recolección y el tipo de procesado en industria, siendo el aderezo en verde al estilo sevillano uno de los métodos de procesado más empleados (Rejano et al., 2010; Campus et al., 2018). La de mayor producción a nivel nacional es la variedad ‘Hojiblanca’ con un 46% frente a un 36% y 7% para las variedades ‘Manzanilla de Sevilla’ y ‘Gordal’, respectivamente, copando prácticamente todo el mercado (Consejería de Agricultura Pesca Agua y Desarrollo Rural, 2023; Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, 2023). Sin embargo, ‘Manzanilla de Sevilla’ es la variedad más susceptible a los defectos provocados por la recolección, sobre todo cuando se emplea la recolección mecanizada, siendo la ‘Hojiblanca’ la más resistente (Jiménez-Jiménez et al., 2013a). Otra variedad de mesa de menor implantación es la ‘Manzanilla Cacereña’, localizada, principalmente, en la provincia que la da el nombre, teniendo doble aptitud, buena adaptación para la recolección mecanizada y características, para el aderezo, similares a su homónima sevillana.

La recolección es la operación más importante, siendo el destino industrial de la producción (entamadora o almazara) y la variedad, los factores que condicionan el empleo de unos métodos frente a otros (Zipori et al., 2014).

Para el procesamiento en verde al estilo sevillano, el producto debe presentar una calidad alta en cuanto a su aspecto visual y esto está relacionado con el método de recolección empleado. Por ello, la recolección manual a ordeño todavía es empleada, aunque también genera daños al fruto. Sin embargo, estos todavía difieren bastante de los ocasionados por medios de recolección mecanizada, sin olvidar el generado por la gestión posterior del fruto (Hussein et al., 2020) (Figura 2a). Sin embargo, la recolección manual, tiene el inconveniente de su alto coste derivado de la gran cantidad de mano de obra que necesita, lo que, en los últimos años, se ha agravado con la poca disponibilidad de esta.

La solución alternativa, para garantizar la supervivencia futura del cultivo, es la mecanización de la recolección, lo cual no es fácil, debido a los condicionantes de calidad ya indicados. Esto hace que se requiera un estudio específico de los diferentes factores que afectan al cultivo, como son las variedades y los medios de recolección y gestión del fruto, con el objetivo de mantener la calidad de este (Biton et al., 2016). Actualmente, los vibradores de troncos, acompañados normalmente por sacudidores de ramas o varas, suelen ser la principal alternativa en aquellas explotaciones que prescinden del método de ordeño a costa de bajar la calidad del producto, aunque reducen los medios y el tiempo de recolección necesarios, ganando en rentabilidad (Figura 2b). Por ello, la investigación en este sentido debe tender hacia una mecanización integral de la recolección que permita mantener la calidad del fruto mediante tratamientos postcosecha (Ferguson et al., 2010; Sola-Guirado et al., 2020b). Para el caso de muchas explotaciones agrícolas en las que el uso de maquinaria acoplada al tractor o autopropulsada no es una solución viable, debido a la orografía existente, al pequeño tamaño de

la explotación o a la falta de recursos, se pueden emplear sistemas semi-mecanizados, sacudidores y vibradores de ramas (Bernardi et al., 2018), o continuar con métodos tradicionales como el vareo en los que el fruto se derriba sobre fardos en el suelo o sistemas suspendidos. En cualquier caso, se requieren estudios sobre el empleo de este tipo de métodos de recolección e interceptación para evaluar la calidad del fruto obtenido con el objetivo de determinar los más idóneos.



Figura 2. Métodos de recolección de la aceituna de mesa. Recolección mediante ordeño del árbol (izquierda) y recolección mecanizada con vibrador de troncos apoyo mediante sistemas semi-mecanizados (derecha) (Gil-Ribes et al., 2017)

2.2 Calidad en aceituna de mesa

Según el Real Decreto 679/2016, 2016, de 16 de diciembre, por el que se establece la norma de calidad de las aceitunas de mesa, la calidad está determinada por un estado de madurez y tamaños adecuados y unos límites máximos de defectos en función de las categorías comerciales (Extra, Primera y Segunda) a las que vayan destinadas.

Por estado de madurez se pueden distinguir los frutos verdes, de color cambiante y negros, siguiendo el proceso de evolución natural de los colores en el epicarpio. Este proceso de evolución de la madurez ha sido estudiado por algunos autores siendo la escala propuesta por Ferreira (1979) una de las escalas de maduración más usadas para indicar el estado del fruto (Figura 3). En cuanto al tamaño, las aceitunas comercializadas deben ser homogéneas presentando una ligera desviación. El parámetro común para referirse al tamaño es el calibre que se corresponde con el número de frutos que contiene un 1 kg con diferencias de diámetro máximas entre frutos de 3 mm. Con esta norma, por ejemplo, para un bote que indica aceitunas con calibre 160-180, tendríamos que cada aceituna tiene un peso que puede oscilar entre 6.25 y 5.56 g. Los defectos indicados en la norma son conocidos en literatura con el término ‘molestado’, siendo aquellas manchas en tonos verde-marrón, que aparecen en el epicarpio del fruto y que varían según el tiempo transcurrido desde su generación (Jimenez-Jimenez et al., 2013b). Las manchas de molestado son provocadas por el método de recolección empleado y los medios de gestión logística posterior del fruto hasta su entrega en la industria de procesamiento. Los métodos de recolección desprenden la aceituna efectuando un daño al fruto, aunque con características diferentes en función del sistema empleado, debido a que los daños están relacionados con el nivel de energía que reciben (Jiménez-Jiménez et al., 2013b), así como por la altura de la caída sobre los medios de interceptación (Saracoglu et al., 2011). Además de la recolección, el molestado en el fruto también puede aparecer de forma natural por la interacción con las hojas y ramas, insectos, factores meteorológicos, animales, etc.



Figura 3. Escala usada comúnmente para la evaluación del índice de madurez del fruto (Montaño et al., 2018)

La evaluación de la calidad de las aceitunas se puede realizar por métodos de medida manual y visuales directos o mediante técnicas informatizadas de análisis de imágenes, siendo éstas muy empleadas en la actualidad, permitiendo la determinación de tamaños de fruto (calibre), grado de madurez y molestado, mediante algoritmos basados en *machine learning* (Figura 4) (Sola-Guirado et al., 2020a). Estudios diversos han ahondado en el tema permitiendo la determinación de las variedades en diferentes muestras mediante la aplicación de diversos algoritmos aplicados a fotografías tomadas de los frutos y sus huesos (Beyaz et al., 2017); estableciendo la correlación entre los diámetros del fruto y su masa para la determinación del peso Ponce et al., (2019); y determinando la madurez de los frutos, mediante el empleo de imágenes en el espacio de color RGB y NIR Guzmán et al., (2015), y el tipo de daño, a través del color y la forma del molestado para su segmentación (Beyaz et al., 2019).

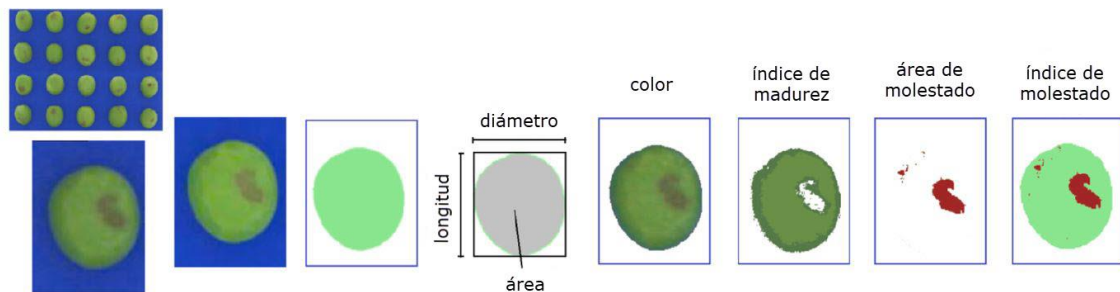


Figura 4. Algoritmo propuesto por Sola-Guirado et al., (2020a) para evaluación de la calidad del fruto

Otros estudios han enumerado diferentes procedimientos para caracterizar el molestado tanto interior como exterior en diferentes frutos frescos (Opara and Pathare, 2014), clasificado el molestado en diferentes categorías según el nivel de daños (Jimenez-Jimenez et al., 2013b) o el factor causante del mismo, entre granizo, deshidratación, insectos, etc. (Riquelme et al., 2008).

Técnicas no destructivas, como las imágenes espectrales, las técnicas nucleares, las imágenes térmicas y las imágenes por ultrasonidos, entre otras, también tienen un gran potencial para determinar las propiedades internas de los frutos y cuantificar el molestado (Ahmed et al., 2017; Moscetti et al., 2016).

Aunque las técnicas análisis de imágenes en el espectro visible están más limitadas ya que solo pueden caracterizar los daños externos del fruto, su uso para la caracterización de aceitunas verdes que se procesan al estilo sevillano (Campus et al., 2018) puede ser suficiente. Esta tecnología es de bajo coste, pero no hay que olvidar que un daño superficial también puede llevar asociado un daño en las capas más internas (Li and Thomas, 2014). Es difícil, por tanto,

establecer una fórmula empírica para la cuantificación del molesto, que depende de diferentes parámetros como la variedad y el estado de madurez, entre otros. Una caracterización adecuada debería tener en cuenta la cantidad, la forma y el color del daño.

La caracterización cuantitativa de los daños parte del cálculo de la superficie de molesto generada. Si se considera la relación entre el área de molesto y el área total del fruto (Jimenez-Jimenez et al., 2013b) es posible establecer un índice de molesto ‘Bruise Index’ (BI). Este índice permite establecer una cuantificación del daño, sin establecer niveles discretos, tal y como proponen (Hadi et al., 2009). A la hora de cuantificar el molesto del fruto, es importante indicar si se trata del molesto respecto de la superficie total del fruto (Corkidi et al., 2006), ya que puede diferir bastante del molesto considerando solo una parte de este. La relación del índice de molesto con los sistemas de recolección de aceituna de mesa más empleados proporcionaría una valiosa información para mejorar la calidad de la mecanización. Asimismo, otro parámetro de interés podría ser la caracterización de la forma del daño generado, en línea con las consideraciones de otros autores respecto al cálculo del molesto en otros frutos (Ahmed et al., 2017; Kitthawee et al., 2011; Van Zeebroeck et al., 2007)

Indudablemente, como ya se ha indicado, el tratamiento postcosecha de los frutos recolectados es clave para la obtención de la calidad del producto final y, por tanto, del precio de mercado. El método industrial predominante es procesamiento en verde al estilo sevillano para la aceituna de mesa (Sánchez-Gómez et al., 2013; Real Decreto 679/2016) y para ello se requiere que el fruto recolectado presente el menor molesto posible. Sin embargo, en la actualidad, no existe ninguna operación de postcosecha en el campo antes de transportar el fruto recolectados a la entamadora, por lo que los parámetros de molesto, grado de madurez o tamaño del fruto se tienen en cuenta sólo al realizar la fase industrial. El transporte se realiza normalmente en seco, en remolques convencionales de diferentes capacidades o sistemas de almacenamiento estándar tipo *big box*, entre otros. En pocas ocasiones, algunas explotaciones limpian el fruto de piedras, hojas y ramas con máquinas de la industria adaptadas al campo (Cuberos Gallego, 2007; López Moreno, 2007) y, seguidamente, realizan su almacenamiento temporal en líquido mediante camiones cisterna con capacidad para unos 15.000 kg de aceitunas (Figura 5). Estos van equipados con una solución de hidróxido sódico al 0.3%, previamente refrigerada en la industria, que limita el avance del molesto del fruto causado por la recolección mecanizada (Morales-Sillero et al., 2014). El uso del líquido refrigerado conlleva el control de los factores que afectan al aumento de la temperatura de éste, para asegurarse de que cumple con su función, como son el tiempo transcurrido desde que la cisterna sale de la entamadora hacia la zona de trabajo en campo hasta su regreso con el lote recolectado y las temperaturas del fruto y del ambiente en el momento de la recolección. No obstante, los casos de uso del transporte en líquido son poco habituales y, normalmente, este tratamiento se realiza en las instalaciones de la industria una vez recibido el fruto (Rejano et al., 2010).



Figura 5. Limpieza de la aceituna de mesa e inmersión en líquido para transporte a industria

Una vez en la entamadora, se utilizan máquinas que clasifican el fruto en lotes según su calidad y separan aquel que puede comercializarse como aceituna de mesa del que debe enviarse a la almazara para la obtención de aceite. Estas máquinas evalúan diversos parámetros externos del fruto como el calibre o el tamaño, el daño o el índice de madurez externo (Díaz, 2016), la madurez interna, la composición, etc. (Guzmán et al., 2013). Por un lado, se usan máquinas de calibrado mecánico para retirar el fruto de pequeño tamaño (denominado perdigón) y dejar pasar el que presenta un tamaño adecuado para comercializarse. Además, permiten clasificar el fruto según los diferentes calibres comerciales. Este proceso resulta vital de cara a realizar un proceso de cocción posterior adecuado en función del tamaño del fruto. Las máquinas de calibrado están formadas por carriles con cables o rodillos con separación suficiente para que los frutos pequeños caigan entre ellos y dejen pasar los de tamaño adecuado. Por otro lado, se usan máquinas de clasificación que disponen de cintas transportadoras en las que el fruto pasa a través de un sistema de evaluación. En su interior, mediante técnicas de procesamiento de imágenes y visión artificial (Puerto et al., 2015), cada fruto es evaluado y se le asigna una categoría que indica su idoneidad para continuar con el proceso normal (línea de cocido) (Figura 6) o para ser descartado (normalmente mediante un sistema de soplado por aire se retira de la línea principal y se almacena aparte). Las aceitunas descartadas ya sea por tamaño, molestado o madurez, se envían a la almazara para la extracción del aceite.



Figura 6. Sistemas de clasificación de calidad de aceituna de mesa en la industria (Mutliscan Technologies, 2023)

2.3 Monitores de cosecha

La recolección es una de las operaciones más importantes en la producción de cultivos frutales como el olivo, los cítricos o los frutos secos. Esta operación puede realizarse de forma manual, semi-mecanizada con máquinas unipersonales o puede mecanizarse con vibradores de

troncos y sacudidores de copa. Sea cual sea el cultivo, el fruto recolectado se carga en sistemas de almacenamiento o contenedores de diferentes tipos y geometrías, que se van llenando y se transportan por la parcela hasta que se completa su capacidad. Desde hace varios años, con la mecanización de los cultivos y el uso de las cosechadoras integrales, en algunas de estas se han implementado los denominados monitores de cosecha o rendimiento. Estos sistemas permiten monitorizar, registrar y georreferenciar la cantidad de cosecha en tiempo real mientras la maquinaria se está desplazando (Chang et al., 2012; Corrêdo et al., 2021). La información generada por un monitor de rendimiento facilita el análisis de la variabilidad espacial de la producción en la explotación (kg/ha) y la toma de decisiones para una gestión eficaz aplicando técnicas de agricultura de precisión (Shafi et al., 2019) (Figura 7). Además, facilita la gestión de la trazabilidad del producto al permitir el registro del recorrido efectuado por los diferentes lotes de fruto recolectado y establecer una conexión campo-industria al digitalizar la información (Bayano-Tejero et al., 2019). Todo esto resulta vital para aportar un valor añadido y establecer un control detallado del recorrido del producto ante una legislación que cada vez exige información más precisa sobre la trazabilidad y transparencia sobre el producto que se consume (Qian et al., 2020).

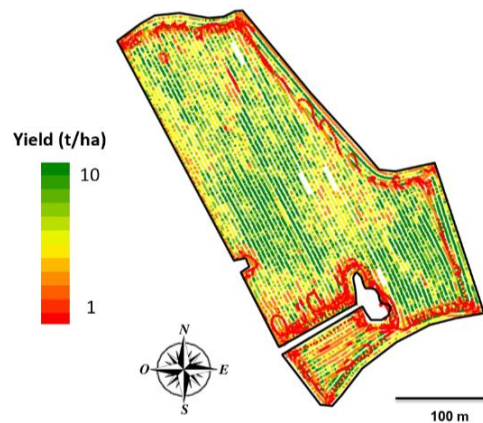


Figura 7. Mapa de rendimiento proporcionado por un monitor de cosecha de una cosechadora de grano (Aspexit, 2020)

Para determinados cultivos, como la vid o los cereales, está muy extendido el uso de monitores de rendimiento, que utilizan diferentes tecnologías para determinar la cantidad de cosecha recogida. Los sistemas utilizados para cultivos de grano, que fueron los primeros, suelen ser placas de impacto que miden el desplazamiento del grano al impactar sobre esta (Chung et al., 2016). Otro sistema habitual consiste en medir el tiempo que un rayo láser queda total o parcialmente bloqueado por un montón de grano que se desplaza verticalmente mediante un elevador de cangilones. Las cosechadoras de uva suelen emplear un sistema de células de carga montadas bajo la cinta de descarga junto con un sensor para medir la velocidad de la cinta y estimar así el peso del fruto cosechado (Taylor et al., 2016). Algunos estudios han empleado caudalímetros volumétricos con sensores ultrasónicos en combinación con el coeficiente de densidad del fruto (Taylor, 2004).

Además de la medida de cantidad del fruto cosechado, debe existir una asociación en tiempo real con las coordenadas geográficas donde se realiza la cosecha, que permitan obtener un mapa de rendimiento. Para ello, es necesario disponer de un sistema GNSS (Global Navigation Satellite System) instalado en la cosechadora, sincronizado con el sistema de pesaje (Longchamps et al., 2019). Posteriormente, con procesamiento mediante software SIG (Sistema de Información Geográfica), es posible crear mapas de cosecha sobre una base cartográfica, proporcionando así

información valiosa sobre la producción y facilitando la toma de decisiones basadas en dichos datos (Zagórda and Walczykova, 2018).

El método de medición del peso de fruto cosechado basado en células de carga está bastante extendido. La ventaja de utilizar este tipo de sensores de medición de fuerza es que permiten una medición directa y no requieren el uso de correlaciones ni filtrado de señales, que pueden introducir errores. Sin embargo, también presentan algunos inconvenientes. Por un lado, para lograr mediciones precisas su instalación puede ser más compleja y costosa. Por otro, su uso en un entorno dinámico puede acarrear problemas de precisión y ruido en la señal registrada debido a la irregular orografía agrícola, al movimiento del fruto y a las aceleraciones/desaceleraciones que experimentan las máquinas durante su funcionamiento. Estos factores pueden producir un porcentaje medio de error superior al 9 % con caudales elevados de fruto (Maja and Ehsani, 2010). Estos problemas hacen que el uso de células de carga para este fin deba estudiarse detenidamente. Por ello, en algunos estudios se han planteado tecnologías alternativas a este sistema de pesaje para la obtención del rendimiento.

Como alternativas al pesaje directo del fruto en diferentes partes de la máquina se pueden encontrar diferentes tecnologías basadas en sistemas de visión. Entre estas tecnologías destaca la captura de imágenes del fruto en el árbol antes de la recolección con cámaras RGB y el análisis mediante algoritmos de inteligencia artificial para realizar una estimación de la cosecha existente (Roy et al., 2019). Sin embargo, estos sistemas requieren del desarrollo previo de algoritmos de elevada complejidad y su aplicación puede ser adecuada sólo para determinados cultivos donde los frutos se localizan en el exterior de la copa del árbol.

Otra alternativa es la estimación del peso midiendo el volumen de fruto cosechado. Esta estimación es posible ya que las cosechadoras suelen incorporar unidades de almacenamiento donde se carga el fruto, que pueden ser paletizables, por ejemplo, cajas y *big box*, o flexibles, como sacos o *big bags*. Es posible medir el aumento de volumen de estas unidades de almacenamiento mientras se llenan empleando para ello sensores de medición de distancia (Price et al., 2017). Una de las tecnologías ampliamente usadas en agricultura de precisión es el LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging), cuyo funcionamiento se basa en la tecnología de tiempo de vuelo (ToF). Esta tecnología realiza mediciones de distancia sin contacto mediante un láser giratorio que emite un haz de luz y calcula el tiempo que tarda en reflejarse en un objeto y volver al sensor para realizar una conversión a distancia. Gracias a su gran exactitud, los LiDAR se utilizan habitualmente en aplicaciones de campo, instalados en drones para escanear el entorno (Christiansen et al., 2017), a bordo de maquinaria para estimar el rendimiento de los cultivos (Gené-Mola et al., 2020) o en cosechadoras sobre una cinta transportadora (Jadhav et al., 2014). Sin embargo, se trata de una tecnología de alto coste que requiere un potente sistema de procesamiento de datos en tiempo real. Otra tecnología que puede realizar una función similar al LiDAR para la medición de volúmenes son las cámaras 3D, también basadas en la técnica de medición ToF. Una cámara 3D mide la distancia entre la cámara y el objeto y captura esta información en forma de imagen con una resolución determinada. Estos sistemas están avanzando profundamente y se utilizan en diversas aplicaciones para la detección y localización de frutos (Fu et al., 2020; Gongal et al., 2015). Así, el uso de cámaras 3D, con un coste mucho menor en comparación con la tecnología LiDAR, puede ser de interés para estimar la cantidad de fruto cosechado en función de su volumen almacenado, aunque hasta la fecha no se han encontrado estudios que haga uso de este enfoque.

La estimación del peso por volumen podría ser útil para cultivos como el olivar, los cítricos, los frutos secos, la uva u otros que pueden recolectarse mecánicamente y almacenarse

durante la operación (Ravetti, 2014; Ye et al., 2017). En el caso del olivar, existen varias cosechadoras en desarrollo (Sola-Guirado et al., 2020) y otras comerciales (Sola-Guirado et al., 2019) pero no hay ninguna que incorpore un monitor de rendimiento que permita obtener mapas con medidas continuas similares a las cosechadoras de grano. Algunas marcas como New Holland, en su modelo Braud 9090X para olivar, incorporó hace ya unos años un sistema de pesaje en estático y sistema GNSS para georreferenciación de la cosecha (Figura 8), pero no permite obtener el rendimiento en tiempo real ni variabilidad espacial con gran detalle.



Figura 8. Cosechadora cabalgante para olivar superintensivo. Detalle de descarga de tolvas de almacenamiento del fruto en remolque (arriba). Sistema de monitorización de rendimiento (abajo) (New Holland, 2023).

2.4 Trazabilidad en aceituna de mesa

La calidad y trazabilidad de los alimentos desempeñan un papel fundamental en nuestra sociedad. En base a esto, se define el concepto de trazabilidad, también de plena actualidad, como la capacidad de encontrar y seguir el rastro, a través de todas las etapas de la producción, transformación y distribución, de un alimento, pienso o ingrediente (Reglamento CE 178/2002, 2008). La calidad y la seguridad de los alimentos desempeñan un papel fundamental en nuestra sociedad. Un correcto sistema de trazabilidad implica un adecuado control y seguimiento del producto primario en el itinerario seguido durante cada fase de la cadena de producción alimentaria, identificando tanto el origen como todos los procesos sufridos a lo largo de su producción.

La implantación de un sistema de trazabilidad fiable en el sector agroalimentario puede aportar numerosas ventajas a todos los niveles de la cadena de producción: campo, industria y mercado. Pero, en general, y, más concretamente en el sector oleícola, no existen sistemas que permitan la integración de dichos niveles de forma automática, comenzando la trazabilidad real con la llegada del fruto a la industria. Es verdad que en campo los técnicos y agricultores están obligados a generar muchos datos, siendo los más habituales los de los productos fitosanitarios utilizados y la parcela de producción (Real Decreto 1311/2012, 2012), que vienen a conformar parte del cuaderno de campo. Esta información está vinculada al código SIGPAC, un número único asociado a la identificación geográfica de las parcelas declaradas por los agricultores y al uso del suelo, que es gestionado por una aplicación SIG creada por el Ministerio de Agricultura,

Pesca y Alimentación de España. Este código está legalmente reconocido y se utiliza para muchos usos, como la gestión de las ayudas económicas de la Política Agraria Común, existiendo algunas aplicaciones que permiten digitalizar estos datos para un control más exhaustivo (Valencia-García et al., 2018). Sin embargo, todas ellas tienen un alto componente manual y no incluyen todos los datos que serían necesarios para caracterizar las operaciones, fundamentalmente, mecanizadas que se han realizado: laboreo, manejo de cubiertas, abonado, aplicación de productos fitosanitarios, poda, recolección, transporte, etc.), ni los insumos empleados. En definitiva, existe escasa información más allá del cuaderno de campo que el agricultor está obligado a cumplimentar por normativa y presentar a las autoridades competentes (Bayano-Tejero et al., 2019). Esta falta de información dificulta la creación de lotes diferenciados de productos con datos asociados en toda la cadena de producción. Actualmente, conseguir el registro real de todas las operaciones realizadas en campo es básico para extender la información a otros ámbitos relacionados, como el cálculo de la Huella de Carbono y los Análisis de Ciclos de Vida (ACV).

Respecto del software de gestión agrícola (SGF), existen muchas posibilidades en función de las necesidades a cubrir (Fountas et al., 2015). El productor puede supervisar diferentes tareas del ciclo productivo como la gestión de la maquinaria y el control de costes (Paraforos et al., 2017), la monitorización de cultivos (López-Riquelme et al., 2017), la gestión del riego (Bartlett et al., 2015), parámetros de producción y rendimiento (Tan et al., 2015) o la identificación y origen de plantaciones de productos primarios (Cunha et al., 2010). Para otras operaciones, como la recolección, la gestión de la trazabilidad es más complicada debido a la diferencia de prácticas llevadas a cabo en cada explotación y los medios usados para ello. A nivel industrial, existe una amplia gama de aplicaciones comerciales basadas en *software* de planificación de recursos empresariales (ERP) que tienen el propósito general de controlar los recursos y garantizar la trazabilidad del producto desde que entra en la industria hasta que sale (Li et al., 2017). Sin embargo, no existe una conexión automática fiable y eficiente para la transferencia de datos del campo a la industria y conservar la mayor cantidad posible de la información generada. Esto facilitaría la clasificación de los lotes, su identificación inmediata y, en caso de riesgo, la identificación de las causas y el alcance del problema (Resende-Filho and Hurley, 2012).

Para desarrollar sistemas de trazabilidad integrales hay que monitorizar el trabajo de las máquinas (sensores y georreferenciación) e identificar los lotes de los productos obtenidos en campo procedentes de las parcelas que trabajan dichas máquinas. En la identificación, la tecnología RFID, ha sido utilizada con éxito para muchas aplicaciones (Ruiz-García and Lunadei, 2011) y es válida tanto para la identificación de lotes de productos como para el registro de información (Dadi et al., 2021). Los sistemas RFID se comunican bajo protocolos estándar, utilizan etiquetas que ofrecen una gran versatilidad y bajo coste para la gestión de la información (Costa et al., 2013) y han demostrado importantes ventajas frente a otras tecnologías de identificación como los códigos 2D (Qian et al., 2012). Por otro lado, la georreferenciación, mediante la tecnología GNSS, posibilita registrar la ruta seguida por la maquinaria empleada en las operaciones de campo y los medios de transporte del fruto, permitiendo trazar el recorrido de todo el flujo de fruto hasta su llegada a la industria y su salida hacia el punto de venta final (LAM and IP, 2019). En combinación con los sistemas de información geográfica (SIG), se han desarrollado aplicaciones para el trabajo en campo aplicando dosificación variable de productos fitosanitarios (Pérez-Ruiz et al., 2011), riego adaptado a las condiciones del suelo (Privette et al., 2011), monitores de rendimiento (Magalhães and Cerri, 2007) o guiado automático de maquinaria (Perez-Ruiz et al., 2012).

El registro y visualización de la información obtenida se puede realizar con sistemas de computación en la nube. Estos han demostrado su capacidad de adaptación al sector agrícola en

muchas aplicaciones (Choudhary et al., 2016) y aportan numerosas ventajas como la eficiencia, la reducción de costes, la calidad y la seguridad alimentaria (Bo and Wang, 2011). La información generada en el campo, durante el transporte y en la industria puede almacenarse y mostrarse al usuario de forma adecuada y gestionar los recursos desde cualquier lugar y en cualquier momento (Channe et al., 2015). El uso de plataformas comunes de registro e intercambio de datos a través de protocolos estándar establecidos permite la integración entre campo e industria para lograr una trazabilidad integral durante el ciclo productivo (Bayano-Tejero et al., 2019). Finalmente, los códigos QR han resultado ser muy útiles para proporcionar al consumidor un enlace a la información asociada a un producto (Tarjan et al., 2014) mediante un sistema de identificación 2D de código abierto que permite una lectura rápida, omnidireccional y el almacenamiento de hasta 7089 caracteres, incluso con alta capacidad para restaurar los datos de lectura si una porción del área del código está dañada. Esto los hace ideales para aplicaciones de identificación y trazabilidad de productos (Suresh et al., 2014).

En el sector de la aceituna de mesa, la situación es similar a la comentada anteriormente, no existiendo en la actualidad, una conexión integral campo-industria. Las tecnologías comentadas anteriormente podrían usarse para gestionar la trazabilidad del producto desde la fase de campo, pero esto sólo se realiza una vez que el fruto ya está en la industria. Allí, es procesado con el objetivo de conseguir homogeneidad, calidad y seguridad adecuada (IOOC, 2004) sucediéndose diferentes operaciones que implican una pérdida de información de trazabilidad que ya ha sido previamente registrada (Sánchez Gómez et al., 2006). Entre estas operaciones podemos destacar la limpieza de las partidas de frutos y eliminación de frutos de pequeño tamaño, la separación de aceitunas con madurez avanzada (índice de madurez ≥ 3) o la clasificación según los defectos presentes. Estas operaciones podrían realizarse en campo, consiguiendo así una verdadera mejora de la trazabilidad. La clasificación previa en campo en base a la calidad de la aceituna (grado de madurez, calibre o molesto) supondría construir lotes ya identificados por sus características (parcela de donde provienen las aceitunas y operaciones realizadas sobre ella) que una vez en la entamadora agilizarían el proceso previo de identificación.

Actualmente, si se construyen lotes en campo, estos son descompuestos una vez que llegan a la industria, por tanto, no es viable salvo que se modifiquen dichas pautas, siendo, para ello, necesario crear un sistema logístico y de información que permita realizar una conexión exitosa entre el campo y la industria para mantener la trazabilidad y calidad de los frutos, así como enviar desde el origen a las respectivas industrias (almazara y entamadora) el fruto que requieren. El proceso de transporte actual, basado en remolques convencionales o cisternas, en aquellos casos donde se usan, de unas capacidades determinadas, es susceptible de mejora identificando los sistemas empleados y su recorrido. Igualmente aunque se han diseñado y patentado numerosos tipos de maquinaria para limpieza o clasificación de aceitunas mediante parámetros de color (Rufino Valor, 2000; Simon Hendrik et al., 2022; Soler Esteban and Van Olmen, 2014) o tamaño (Ibañez Reche and Ibañez Reche, 2003), su aplicación se reduce al nivel industrial. Una solución interesante para todo esto podría ser disponer de sistemas portátiles de campo que integren todas las funciones comentadas anteriormente (recepción, limpieza, clasificación, almacenamiento y transporte) en una sola máquina; su desarrollo permitiría un registro de la trazabilidad más preciso, al no haber separaciones posteriores en industria de los lotes de fruto creados en campo, y se realizarían transportes de partidas más eficientes, al no enviarse partidas de fruto de calidad no apta para el procesamiento como aceituna de mesa.

3. Justificación.

La producción media mundial de aceituna de mesa se sitúa en torno a 2,9 millones de toneladas, de las cuales España es el principal productor con un 20% de la producción total (ASEMESA, 2023). Dicha producción (98%) viene, principalmente, de las comunidades autónomas de Andalucía (85.2%) y Extremadura (12.8%). Sin embargo, España es seguida de cerca por Egipto (19%) y otros países productores como Turquía, Argelia, Grecia, Siria, Marruecos, Perú y Argentina con presencia creciente (Figura 9). En muchos de estos países el coste de la mano de obra es significativamente menor que en España, por lo que labores como la recolección, que es la operación que exige más mano de obra con costes cercanos al 40% de los costes totales del cultivo (AEMO, 2020), resulta más rentable.

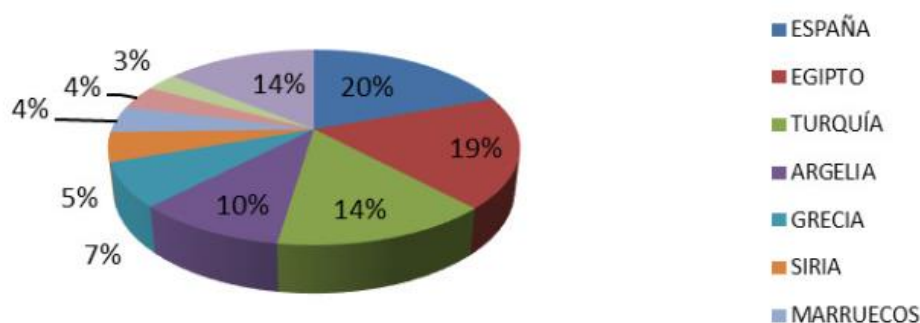


Figura 9. Principales productores mundiales de aceituna de mesa. Media de campañas 2015-2020 (ASEMESA, 2023)

Así, el sector de la aceituna de mesa en España requiere de una mayor tecnificación para poder competir contra estos países emergentes, siendo la calidad y trazabilidad de los productos que exporta los factores principales que aportan un valor añadido y diferenciador del resto. En lo que respecta a la fase industrial, la maquinaria y tecnología disponible para procesar el fruto entrante en partidas de calidad variable presenta un desarrollo avanzado con máquinas de clasificación automática, limpieza, deshuesado, calibrado, etc. En cuanto a la trazabilidad, en esta fase también existen sistemas de información para registro de todo el proceso seguido por el fruto desde que entra en sus instalaciones y sale envasado en unidades que se comercializan en los diferentes puntos de venta.

Sin embargo, la principal innovación debe trasladarse a la fase de campo y a su interconexión con la industria a nivel logístico y de información. Por un lado, con la necesidad imperiosa de mecanizar el cultivo, para hacer frente a los costes de este, es necesario caracterizar los medios de recolección empleados habitualmente respecto del molestado que infringen al fruto y la posibilidad de reducirlo mediante medidas paliativas, para así incrementar el rendimiento económico. Por otro lado, se requiere avanzar en la gestión de la trazabilidad en la fase de recolección generando información respecto de la procedencia del fruto recolectado a un nivel más profundo que la simple ubicación de la parcela, garantizada actualmente mediante el cuaderno de campo del agricultor. La realización de lotes georreferenciados en campo permite obtener información muy valiosa sobre el rendimiento obtenido por unidad de superficie (kg/ha) y esto junto a la clasificación del fruto, también en campo, y a su trazabilidad asociada aporta un nivel mayor de seguridad alimentaria que ayuda a cumplir y superar lo exigido por la normativa, cada vez más restrictiva en este sentido. Garantizar la trazabilidad desde el campo supone asegurar la calidad de los lotes enviados a la industria, ya sea para la producción de aceite o aceituna de mesa y mantener la integridad de la información. Lógicamente, siendo el molestado el principal problema de la aceituna de mesa, esto debe ser combinado con sistemas de tratamiento

postcosecha (Rejano et al., 2010; Zipori et al., 2021) para evitarlo, obteniendo así la mencionada calidad final del fruto que, como ha quedado demostrado, realmente no empieza a conseguirse en la industria sino desde las fases iniciales de campo.

La presente Tesis Doctoral es consecuencia de la innovación y desarrollo realizados en dos proyectos estrechamente relacionados: el Proyecto PYC RE024 ‘Desarrollo de una aplicación IoT de monitorización de la cosecha realizada por diferentes sistemas de recolección mecanizada en olivar tradicional para la mejora de su gestión y trazabilidad’ y el Proyecto de Compra Pública Precomercial (CPP) INNOLIVAR. El Proyecto PYC plantea el estudio, diseño y desarrollo de un monitor de rendimiento configurable que pueda adaptarse a la maquinaria de recolección de la aceituna. El Proyecto CPP INNOLIVAR y, en concreto, su Línea de trabajo 12, aborda la postcosecha de la aceituna de mesa mediante el desarrollo de prototipos precomerciales para el trabajo en campo, equipados con sistemas de limpieza, clasificación en lotes de calidad determinada y almacenamiento en líquido para el transporte a la industria. Al mismo tiempo, diseña una metodología y sistema Cloud para el registro de la trazabilidad de los lotes de fruto, desde el comienzo del ciclo de producción hasta su entrega para el procesamiento.

La presente Tesis Doctoral titulada ‘Tecnologías aplicadas para la caracterización y mejora de la calidad y trazabilidad de la aceituna de mesa en cosecha y postcosecha’ ha permitido profundizar en el estudio de la mecanización de la aceituna de mesa y avanzar en el proceso de cosecha y postcosecha del fruto, estableciendo la influencia de los medios de recolección e interceptación del fruto en su calidad y proponiendo medidas correctoras. Al mismo tiempo, se han propuesto sistemas alternativos para monitorizar la cosecha, que pueden ser implantados en maquinaria de recolección y sobre sistemas de almacenamiento comunes. Finalmente, se ha planteado el diseño, desarrollo y prototipado de una máquina para la realización de lotes de fruto en campo y el almacenamiento en líquido, como clave para mejorar su calidad y garantizar el registro de la trazabilidad en toda la cadena de valor.

Capítulo 2

Hipótesis y objetivos

1. Hipótesis inicial

La recolección mecanizada de las operaciones en el olivar de mesa es necesaria para que sea rentable y se cumpla con los desafíos actuales en cuanto a producción, calidad y seguridad alimentaria. Sin embargo, la aplicación de la maquinaria habitual y las nuevas cosechadoras comerciales conlleva una serie de problemas asociados como la pérdida de calidad del fruto durante el proceso de recolección. Además, los monitores de rendimiento que algunos modelos incorporan, basados en el pesado de la carga, suelen presentar problemas durante el funcionamiento en condiciones de trabajo en campo. Por otro lado, la gestión y registro de la trazabilidad del fruto no es realizada de forma ágil y fiable entre el agricultor y la industria de procesamiento.

Por tanto, la Tesis Doctoral plantea como hipótesis de partida que la incorporación de nuevas tecnologías permitirá avanzar significativamente en la gestión de la calidad del fruto en la fase de campo y garantizar el registro de su trazabilidad en todo el ciclo de producción (del campo a la industria).

2. Objetivos

El objetivo general de la Tesis Doctoral es la evaluación en campo de los procesos mecanizados de cosecha y postcosecha de aceituna de mesa en relación con los parámetros de calidad del fruto y a la implantación de sistemas tecnológicos que permitan la sostenibilidad del cultivo.

El objetivo general se concreta en la consecución de cuatro objetivos específicos, que se relacionan tal como se indica en la Figura 10, y que son:

1. Estudiar el patrón de molestado de la aceituna que se origina durante la recolección en condiciones reales de trabajo.
2. Desarrollar monitores de cosecha adaptables a la maquinaria y equipos de recolección de la aceituna de mesa.
3. Definir metodologías de registro de la trazabilidad en todo el ciclo de producción de la aceituna de mesa.
4. Analizar la viabilidad de la aplicación de nuevas tecnologías para la realización de lotes de fruto en campo en función de su calidad y el registro de su trazabilidad integral.

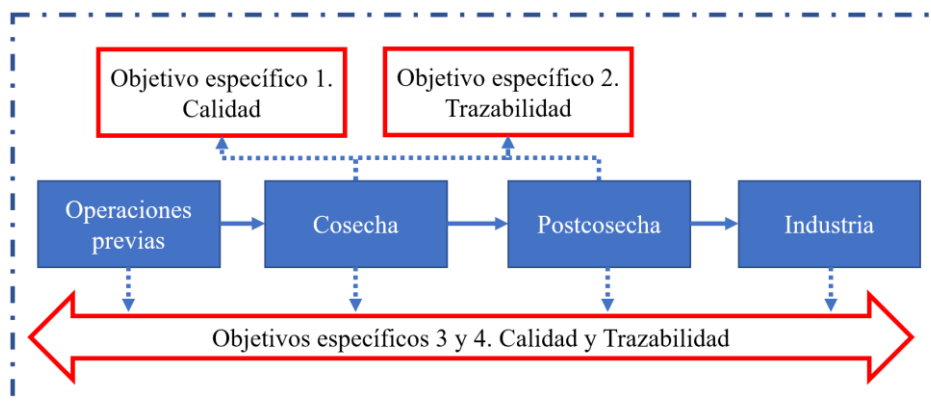


Figura 10. Relación entre los objetivos específicos de la Tesis Doctoral y la fase de campo que abarcan

Los objetivos específicos se desarrollan en cada uno de los Capítulos que conforman la estructura de la Tesis Doctoral y están relacionados con los artículos científicos que constituyen el compendio de artículos que da cumplimiento a la modalidad de Tesis elegida, según se especifica en la Tabla 1.

Tabla 1. Relación entre los artículos científicos, objetivos específicos y capítulos de la Tesis Doctoral

Artículo científico	Objetivo específico	Capítulo
Sola-Guirado, R. R., Bayano-Tejero, S., Aragon-Rodriguez, F., Peña, A., & Blanco-Roldan, G. (2022). Bruising pattern of table olives ('Manzanilla' and 'Hojiblanca' cultivars) caused by hand-held machine harvesting methods. <i>Biosystems Engineering</i> , 215, 188-202. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01.010	1	3. Patrón de molestado en aceitunas de mesa (variedades 'Manzanilla' y 'Hojiblanca') causado por métodos de recolección manuales
Bayano-Tejero, S., Karkee, M., Rodríguez-Lizana, A., & Sola-Guirado, R. R. (2023). Estimation of harvested fruit weight using volume measurements with distance sensors: A case study with olives in a big box. <i>Computers and Electronics in Agriculture</i> , 205, 107620. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107620	2	4. Estimación del peso del fruto recolectado mediante sensores de medición de distancia por volumen ocupado: Un caso de estudio con aceitunas almacenadas en <i>big box</i>
Bayano-Tejero, S., Sola-Guirado, R. R., Gil-Ribes, J. A., & Blanco-Roldán, G. L. (2019). Machine to machine connections for integral management of the olive production. <i>Computers and Electronics in Agriculture</i> , 166, 104980. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104980	3	5. Conexiones máquina a máquina para la gestión integral de la producción de aceitunas
Bayano-Tejero, S., Martínez-Gila, D., Blanco-Roldán, G., & Sola-Guirado, R. R. (2023). Cleaning system, batch sorting and traceability between field-industry in the mechanical harvesting of table olives. <i>Postharvest Biology and Technology</i> , 199, 112278. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112278	3 y 4	6. Sistema de limpieza, clasificación por lotes y trazabilidad entre campo e industria en la recolección mecanizada de aceituna de mesa

Capítulo 3

Patrón de molestado en aceitunas de mesa (variedades 'Manzanilla' y 'Hojiblanca') causado por métodos de recolección manuales

1. Introducción

El procesamiento de la aceituna de mesa al estilo sevillano es el método de elaboración por excelencia para su consumo en fresco. Para ello, se usan principalmente frutos con un índice de madurez en torno a 1 y, por tanto, es necesario controlar la calidad superficial del fruto (daños), ya que esto condiciona su precio en el mercado. Los defectos que el fruto puede sufrir son debidos principalmente a la recolección y a la gestión logística posterior hasta su recepción en la industria de procesamiento. Debido a ello, la recolección de la aceituna de mesa se realiza, mayoritariamente, mediante el método manual tradicional de ordeño, lo que supone una pérdida de rentabilidad considerable frente a la recolección mecanizada, dada la ingente cantidad de mano de obra necesaria para llevarlo a cabo.

En algunas explotaciones se emplea maquinaria de recolección combinada con tratamientos postcosecha para preservar la calidad del fruto hasta su entrega en industria (Rejano et al., 2010). Sin embargo, la introducción de maquinaria no siempre se hace o no es posible debido a características de la parcela y se recurre a sistemas semi-mecanizados como el vibrador de ramas, el sacudidor de ramas o la vara y se derriba el fruto sobre fardos o sobre sistemas suspendidos. Conocer el molestado que puede atribuirse a estos sistemas de recolección es de interés para la toma de decisiones en el manejo final del cultivo ya que su estudio puede conducir a la mejora de estos sistemas o a la selección de uno u otro para llevar a cabo la recolección.

El objetivo de este trabajo es caracterizar el fruto y el molestado que se producen en aceitunas verdes de mesa, concretamente en las variedades 'Hojiblanca' y 'Manzanilla de Sevilla', empleando técnicas de visión artificial tras la utilización de métodos de recolección habituales (Figura 11). Estos parámetros se evaluaron cuando el daño externo se había estabilizado y, además, durante la evolución temporal. La comparación de la cuantificación de los daños también tuvo en cuenta toda la superficie del fruto frente a una sola cara o vista parcial de este.



Figura 11. Patrón de molestado característico en aceituna de mesa variedad 'Manzanilla' y 'Hojiblanca' para los sistemas de recolección estudiados

2. Materiales y métodos

Se realizaron una serie de ensayos que consistieron en cosechar aceitunas según diferentes tratamientos y analizar los patrones de daños externos causados a los frutos mediante análisis de imagen.

2.1 Obtención de imágenes para caracterizar las aceitunas

Las muestras de aceitunas se colocaron en bandejas cuadradas fabricadas en ácido poliláctico (PLA) de 0.18 m, recubiertas de una película azul de espuma EVA con perforaciones elipsoidales para la colocación de 20 frutos (Figura 12). Las muestras se colocaron en una cámara de iluminación cerrada (Sola-Guirado et al., 2020a) con iluminación controlada 13.95 ± 0.57 lux y una temperatura de color de 5500 K mediante el uso de 4 barras LED situadas en el suelo de la cámara con una inclinación de 30° e iluminación difusa. Se colocó una cámara digital (Nikon, D80, Tokio, Japón) sobre las muestras, a 570 mm por encima de la superficie de la bandeja, para tomar fotografías con un ajuste de apertura de $f/6.3$, velocidad de obturación $E=1/125$ s, sensibilidad lumínica ISO:160, distancia focal $FL=35$ mm, y compensación de exposición $EB=-1$ EV. La resolución de cada fotografía fue de 3872×2592 píxeles por bandeja, con una resolución de fruto de 226×197 píxeles.

Cada fotografía fue procesada digitalmente por un experto mediante el programa ImageJ (National Institute of Mental Health) para caracterizar el fruto y la zona molestada. Para ello, en primer lugar, se recortó la imagen para obtener 20 fotografías individuales de cada fruto, identificadas según su tratamiento. La segmentación realizada convirtió cada fotografía en una imagen binaria para extraer las medidas de los frutos. A continuación, mediante la operación de suma de la fotografía binaria con la fotografía original del fruto, se eliminó el fondo. Por último, se segmentó manualmente la zona molestada de cada fruto para obtener otra fotografía con las zonas molestadas aisladas. El análisis de las imágenes reveló los siguientes parámetros útiles para caracterizar el fruto y el patrón de molestado:

- Superficie del fruto y el molestado (mm^2): el número medio de píxeles de cada fruto o molestado mediante la conversión de píxeles a milímetros cuadrados.
- Índice de molestado (%), BI: relación entre la superficie total de molestado de cada fruto y su superficie.
- Longitud y diámetro del fruto (mm). Distancia mayor y menor entre dos puntos de la superficie del fruto, que suelen coincidir con los diámetros mayor y menor de la forma elíptica del fruto.
- Diámetro máximo de Feret (mm) de la mancha de molestado: distancia más larga entre dos puntos cualesquiera a lo largo del límite de selección de la mancha.
- Circularidad (#): redondez o similitud con un círculo perfecto del fruto o mancha de molestado, que varía de 0 a 1, correspondiendo 0 a un polígono infinitamente alargado y 1 a un círculo perfecto.
- Número de manchas: número de manchas de molestado por fruto.
- Color: coordenadas medias en el espacio de color RGB de los píxeles de cada fruto sin tener en cuenta el área de molestado o la mancha de molestado en sí misma.

2.2 Tratamientos de recolección de árboles y muestras de aceituna

Los ensayos se realizaron en dos parcelas diferentes de aceituna de mesa 'Manzanilla de Sevilla' y otras dos de 'Hojiblanca', destinadas a procesado en verde, situadas en Córdoba (España) durante los meses de septiembre y octubre de las campañas de recolección 2018/19 y 2019/20.

Los árboles se encontraban bajo riego y sin estrés biótico ni abiótico. Los sistemas de recolección utilizados para derribar los frutos fueron los empleados habitualmente para este fin: recolección manual (M) como tratamiento de referencia, vara de fibra de vidrio (B), vibrador de ramas manual (BS) (Stihl, SP 481, Waiblingen, Alemania), y sacudidor de ramas manual (SC) (Pellenc, P230, Pertuis, Francia). Las señales de vibración producidas por los métodos de recolección en las ramas principales se registraron utilizando un acelerómetro triaxial MEMS (Gulf Coast Data Concepts LLC X200-4, Waveland, MS), con un rango de medición de $\pm 2000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, una sensibilidad de $0.06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ y una frecuencia de muestreo de 400 Hz. En la Tabla 2 se resumen los patrones de vibración que se registraron en las ramas con estos sistemas.

Tabla 2. Parámetros de vibración medidos en las ramas con fruto mediante los sistemas de recolección

Método de recolección	Aceleración media medida ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	Frecuencia (Hz)
Vara	560.7 \pm 214.3	-
Sacudidor de ramas	79.6 \pm 42.6	14.0 \pm 0.4
Vibrador de ramas	209.3 \pm 81.1	20.6 \pm 1.1

Los valores representados corresponden a media \pm desviación estándar

^a Mean peak value

Cada árbol fue recolectado por un operario de las ramas situadas entre 1.5 y 2.4 m por encima del suelo, utilizando la técnica habitual empleada en la parcela. En el suelo se colocó una malla textil agrícola o fardo (N), como la utilizada habitualmente en la recolección de la aceituna, y una superficie acolchada (P), consistente en dos capas de cloruro de polivinilo de 3 mm de espesor rellenas de aire, de 1 m de diámetro por 0.1 m de altura. Se tomaron muestras de aceitunas de la superficie acolchada para estudiar la incidencia del método de derribo. En el caso de la variedad 'Manzanilla de Sevilla', que presenta mayor susceptibilidad al molestado (Jiménez-Jiménez et al., 2013a), también se tomaron muestras en el fardo en zonas alejadas del acolchado para estudiar la incidencia del medio de interceptación en esta variedad. Además, se recogieron a mano muestras aleatorias sin daños externos y se aplicó un impacto o golpe (H) en el centro del fruto. Para realizarlo se empleó un dispositivo que liberaba una bola de acero de masa 0.035 kg en caída libre desde una altura de 0.125 m, resultando en una energía aplicada al fruto de 0.043 J (Figura 12).

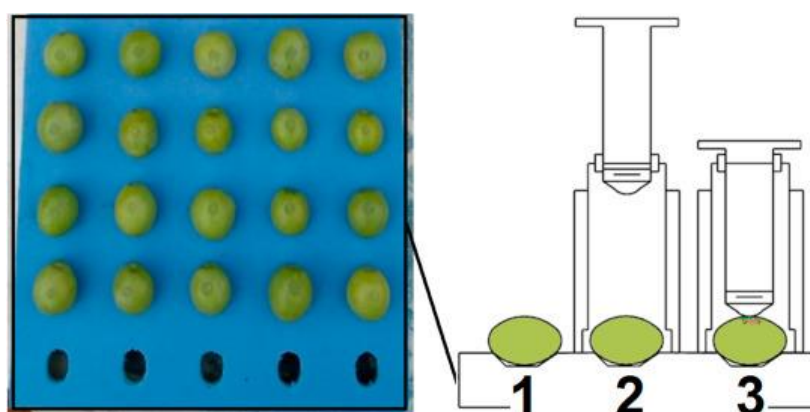


Figura 12. Bandeja con fruto impactado y secuencia del impacto provocado por la caída libre de la bola.

De este modo se obtuvieron los siguientes tratamientos: M-P, BS-P, SC-P, B-P para "Hojiblanca" y M-N, M-P, BS-N, BS-P, SC-N, SC-P, B-N, B-P para "Manzanilla de Sevilla" y H para ambas variedades. Las muestras obtenidas en cada uno de los tratamientos se mantuvieron secas a una temperatura media de 23 °C y se fotografiaron 150 min después de la recolección,

cuando el molesto se había estabilizado (Jimenez-Jimenez et al., 2013b). En la recogida de muestras se evitaron los árboles que circunscriben el perímetro de la parcela. Se seleccionaron al azar tres filas de árboles y, en cada fila, se seleccionaron de nuevo al azar tres árboles para aplicar los tratamientos. Cada árbol fue usado exclusivamente para un método de recolección. Al seleccionar las filas, se descartaron las que correspondían al perímetro de la parcela, así como los árboles situados al principio y al final de estas. Se tomaron 20 muestras de frutos (1 bandeja) de cada árbol para cada tratamiento (BS-P, SC-P, B-P, BS-N, SC-N, B-N), resultando un total de 60 muestras por tratamiento y día. Los tratamientos con un método de recolección común se aplicaron en el mismo árbol, y las muestras se recolectaron simultáneamente utilizando el fardo o la superficie acolchada. En el caso del tratamiento de referencia (M), las aceitunas se recolectaron aleatoriamente de 3 árboles de la fila antes de la aplicación de los tratamientos. En el caso del tratamiento de impacto (H), también se recogieron muestras de aceitunas de los 3 árboles usados por fila para los tratamientos, en diferentes zonas del árbol y sin molesto previo. Estos ensayos se repitieron 4 veces por campaña y parcela, espaciados aproximadamente 5 días, dejando una diferencia mínima de 4 días en caso de precipitaciones.

2.3 Caracterización de las aceitunas y sus daños externos

Se realizaron diferentes tipos de estudios para determinar parámetros útiles para modelizar las aceitunas y su molesto:

1. Caracterización del tamaño y la forma: Se tomaron varios parámetros geométricos para el fruto (longitud, diámetro y circularidad), para las manchas de molesto que presentaban (número de manchas, diámetro de Feret y circularidad) y para todos los tratamientos, extrayendo la información mediante análisis de imágenes. Además, se midió la masa del fruto (g) con una balanza digital (Gram, EH-500, España).
2. Evaluación de la firmeza: La fuerza de penetración necesaria para romper la superficie del fruto se midió con un penetrómetro utilizando una punta cilíndrica de 3 mm de longitud y 2.4 mm de diámetro (IMADA Inc., DS2-11, EE.UU.) en zonas con y sin molesto (las primeras a partir de áreas de manchas mayores de 16 mm²).
3. Determinación del color: Se midieron las características colorimétricas de la aceituna en las zonas del fruto con molesto (área de mancha mayor de 16 mm²) y sin él para todos los tratamientos, utilizando un colorímetro (Konica Minolta, CR-400, USA) calibrado con una iluminación D65 2° medida en el espacio de color CIELAB. Del mismo modo, se determinaron las coordenadas de color RGB de las imágenes procesadas.
4. Índice de molesto y su evolución temporal: El índice de molesto se determinó 150 min después de la recolección para todos los tratamientos, utilizando el análisis de imágenes para extraer el área del fruto y el área dañada. Además, se tomaron imágenes del fruto impactado con el dispositivo de caída libre (H) cada 15 min hasta los 150 min, para evaluar la evolución del molesto en el tiempo.
5. Localización de las manchas de molesto en la superficie del fruto: El cálculo del índice de molesto utiliza normalmente una sola imagen, ignorando lo que ocurre en las zonas no visibles, considerando la geometría elipsoidal de las aceitunas. Para evaluar el molesto del fruto considerando toda su superficie, se diseñó un prototipo (Figura 13) para rotar las aceitunas sobre su eje principal. El dispositivo consta de varios engranajes, con dos agujas en sus centros, donde se colocan muestras de fruto seleccionadas al azar. Se evaluaron 60 muestras de frutos por tratamiento de recolección y variedad, 150 min después de su recolección. Un motor (4076 pasos por vuelta) controlado por un microcontrolador (Arduino,

Nano, Italia) realizó el giro de los frutos, desplazándose 15° cada vez para tomar 24 fotografías por fruto.

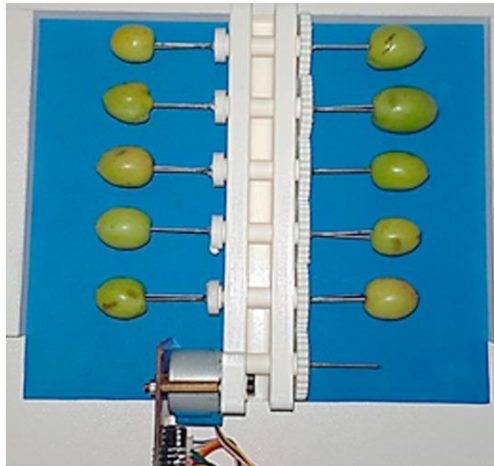


Figura 13. Dispositivo desarrollado para girar las aceitunas y tomar imágenes en 360°

Para determinar la cantidad y la localización de las manchas de molestado producidas en toda la superficie, se procesaron las imágenes para obtener una representación bidimensional completa de la aceituna sin deformación (Figura 14):

- Cada una de las imágenes capturadas se recortó para evitar la superposición de una misma zona, circunscribiendo una elipse cuyo diámetro mayor coincidía con la longitud del fruto y cuyo diámetro menor era el perímetro del fruto ($\pi \cdot \text{diámetro}$) dividido por 24.
- Cada corte se unió al corte consecutivo.
- Todos los píxeles de la composición se agruparon para dar continuidad a la composición manteniendo constante la línea ecuatorial.
- La composición restante se amplió por proyección sobre la curvatura de la elipse en la vista frontal, es decir, haciendo coincidir la distancia entre el pedúnculo y su antípoda con la mitad del perímetro de la elipse determinada en la vista frontal.

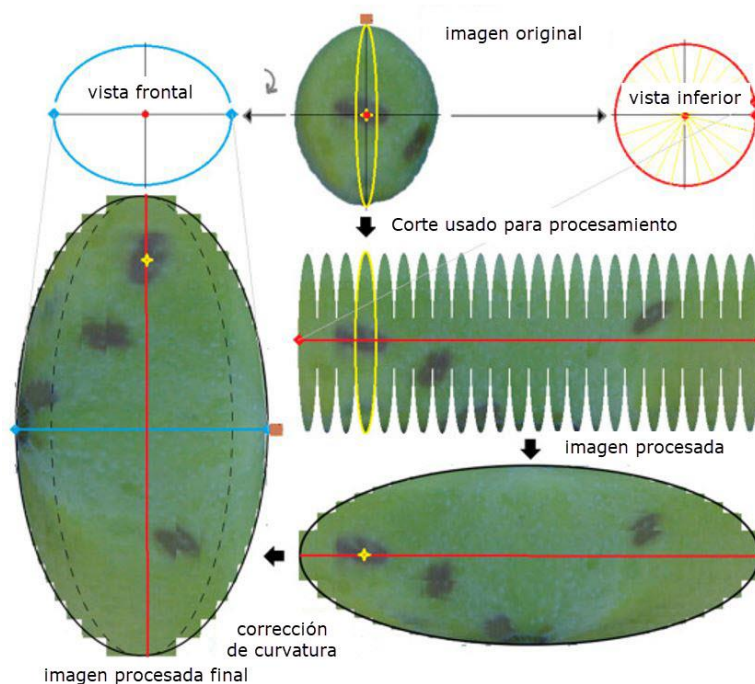


Figura 14. Proceso realizado para la representación de toda la superficie de una aceituna a partir de las 24 fotos de un fruto con giros de 15°

En todos los casos, se investigó la relación existente para todas las variables estudiadas tanto con el método de recolección como con el método de interceptación (en el caso de 'Manzanilla de Sevilla'). También se analizaron las diferencias entre las distintas variedades para finalmente estudiar las relaciones existentes dentro de los distintos parámetros de estudio.

3. Resultados

3.1 Caracterización del tamaño y forma de los frutos molestados

La Tabla 3 muestra la caracterización de la forma y el tamaño de los frutos muestreados para las dos campañas de recolección según los diferentes métodos. Las variables masa, longitud y diámetro de los frutos mostraron una distribución normal (Kolmogorov-Smirnov, $p > 0.05$) para ambas variedades. La comparación de los métodos de recolección (test ANOVA, $p > 0.05$; test post-hoc Tukey, $p > 0.05$) no mostró diferencias significativas en las variables de masa, longitud y diámetro para las dos variedades y temporadas, ni tampoco se encontraron diferencias significativas entre los sistemas de recepción con fardo y acolchado (test ANOVA, $p > 0.05$; test post-hoc Tukey, $p > 0.05$). Sin embargo, sí se encontraron diferencias significativas (prueba t de Student, $p < 0.05$) dentro de cada variedad en la comparación de las campañas 2019 y 2020. El diámetro y la longitud del fruto para ambas variedades mostraron una fuerte correlación positiva con la masa del fruto ('Hojiblanca': Coeficiente de Pearson = 0.88; Coeficiente de Pearson = 0.89; $p < 0.05$; 'Manzanilla de Sevilla': Coeficiente de Pearson = 0.88; Coeficiente de Pearson = 0.91; $p < 0.05$). La circularidad no mostró una distribución normal (Kolmogorov-Smirnov, $p < 0.05$). Se encontraron diferencias significativas en la circularidad entre variedades (Prueba de Wilcoxon-Mann-Whitney, $p < 0.05$), con un valor mediano y un rango intercuartílico en 'Hojiblanca' de 0.865 (0.023) y 0.869 (0.026) en 'Manzanilla de Sevilla', con diferencias difusas entre métodos de recolección.

Tabla 3. Valores de tamaño y forma de los frutos medidos en dos campañas de recolección según el método de derribo con interceptación acolchada y variedad de aceituna

Método de derribo	Variedad	Masa (g) ^a	Longitud ^a (mm)	Diámetro ^a (mm)	Circularidad
Manual	'Hojiblanca'	3.64±0.84 a	22.42±2.01 a	17.71±1.49 a	0.869 (0.024) a
	'Manzanilla'	4.22±1.00 b	22.72±2.27 abc	18.62±1.86 b	0.877 (0.024) b
Vibrador de ramas	'Hojiblanca'	3.58±0.83 a	22.43±2.02 a	17.60±1.56 a	0.864 (0.021) c
	'Manzanilla'	3.91±0.98 c	22.92±2.11 bd	18.47±1.63 b	0.866 (0.026) ac
Sacudidor de ramas	'Hojiblanca'	3.56±0.70 a	22.36±1.64 a	17.68±1.35 a	0.863 (0.024) c
	'Manzanilla'	3.90±0.97 c	22.59±2.13 ab	18.25±1.78 b	0.867 (0.025) a
Vara de fibra	'Hojiblanca'	4.78±0.86 d	23.32±1.83 d	19.38±1.41 c	0.878 (0.021) b
	'Manzanilla'	4.74±0.79 d	23.16±1.62 cd	19.35±1.34 c	0.879 (0.022) b

Los valores mostrados son la media ± desviación estándar o la mediana y el rango intercuartílico entre paréntesis. Letras distintas entre filas de la misma columna indican diferencias significativas según

^a Distribución normal (ANOVA, $p < 0.05$; t por pares post hoc con desviación estándar agrupada y método de ajuste de Holm, $p < 0.05$) o

^b Distribución no normal (Kruskal-Wallis, $p < 0.05$; prueba post hoc de suma de rangos de Wilcoxon con método de ajuste de Holm, $p < 0.05$).

La Tabla 4 muestra algunos parámetros representativos del tamaño y la forma características de las manchas de molestado en los frutos. El número de manchas por fruto no siguió una distribución normal. Para ambas campañas y variedades, el número de manchas fue

significativamente diferente (Kruskal-Wallis, $p < 0.05$) entre el método manual y los otros métodos de derribo (prueba post hoc de suma de rangos de Wilcoxon con ajuste de Holm, $p < 0.05$), en los que no hubo diferencias entre ellos (prueba post hoc de suma de rangos de Wilcoxon con ajuste de Holm, $p > 0.05$). En todos los casos, el número de manchas dentro de los mismos métodos de derribo aumentó en la interceptación con fardo en comparación con la interceptación con superficie acolchada. La circularidad de las manchas fue significativamente diferente entre los métodos de derribo para 'Manzanilla de Sevilla' y 'Hojiblanca' (Kruskal-Wallis, $p < 0.05$; test post-hoc de suma de rangos de Wilcoxon con ajuste de Holm, $p < 0.05$), y fue menor para este último en todos los casos. El diámetro medio mayor de Feret de la mancha fue diferente (Kruskal-Wallis, $p < 0.05$; prueba post hoc de suma de rangos de Wilcoxon con ajuste de Holm, $p < 0.05$) entre variedades y métodos de derribo, y ligeramente mayor en 'Hojiblanca', excepto para el sacudidor de ramas, donde fueron iguales.

Tabla 4. Valores de tamaño y forma de la mancha de molestado del fruto medidos en dos temporadas de recolección según el método de derribo e interceptación y la variedad de aceituna

Método de derribo	Método de interceptación	Variedad	Número de manchas	Diámetro de Feret (mm)	Circularidad
Ordeño	Acolchado	'Hojiblanca'	0 (1) a	2.35 (2.10) a	0.709 (0.235) ab
	Acolchado	'Manzanilla'	0 (1) a	16.2 (2.20) b	0.788 (0.314) c
	Fardo		2 (3) b	2.21 (2.01) ab	0.674 (0.233) ab
Vibrador de ramas	Acolchado	'Hojiblanca'	1 (2) c	1.53 (1.10) b	0.725 (0.205) a
	Acolchado	'Manzanilla'	2 (5) b	1.34 (0.83) c	0.787 (0.191) c
	Fardo		3 (4) d	1.99 (1.42) b	0.704 (0.198) ab
Sacudidor de ramas	Acolchado	'Hojiblanca'	1 (2) c	3.04 (2.60) d	0.628 (0.211) d
	Acolchado	'Manzanilla'	2 (3) b	2.79 (2.16) ad	0.677 (0.201) b
	Fardo		3 (2) d	4.41 (2.37) e	0.580 (0.162) e
Vara de fibra	Acolchado	'Hojiblanca'	0 (2) ac	2.08 (2.61) ab	0.666 (0.379) abd
	Acolchado	'Manzanilla'	0 (3) ac	2.37 (2.18) abd	0.664 (0.328) abd
	Fardo		2 (3) b	2.28 (2.34) abd	0.628 (0.305) abd

Los valores representados son la mediana y el rango intercuartílico. Letras distintas indican diferencias significativas entre filas de la misma columna (Kruskal-Wallis, $p < 0.05$; prueba de suma de rangos de Wilcoxon post hoc con método de ajuste de Holm, $p < 0.05$).

3.2 Evaluación de la firmeza

Los valores de la fuerza de penetración en las zonas con molestado y sin molestado del fruto siguieron una distribución normal (Kolmogorov-Smirnov, $p > 0.05$) para ambas variedades. Se encontraron diferencias significativas (prueba t de Student, $p < 0.05$) entre las zonas con y sin molestado del fruto en ambas variedades, con un valor de 14.02 ± 1.92 N y 10.26 ± 1.73 N para la zona molestada en "Hojiblanca" y "Manzanilla de Sevilla", respectivamente, y un valor de 17.11 ± 1.73 N y 13.02 ± 1.32 N para las zonas no molestadas, en "Hojiblanca" y "Manzanilla de Sevilla", respectivamente. Dentro de cada variedad también hubo diferencias significativas entre las zonas molestadas y no molestadas (prueba t emparejada, $p < 0.05$), con una reducción media de la fuerza de penetración del 18% en 'Hojiblanca' y del 21% en 'Manzanilla de Sevilla'.

En cuanto a los métodos de recolección, los frutos de ambas variedades siguieron la misma tendencia en las zonas no molestadas. Hubo diferencias significativas de fuerza de

penetración entre el método manual, que tuvo el valor más alto, y los otros métodos de derribo (test ANOVA, $p < 0.05$; test post-hoc Tukey, $p < 0.05$). En la zona no molestada, no se encontraron diferencias entre el vibrador de ramas y el sacudidor de ramas para 'Hojiblanca' (prueba t de Student, $p > 0.05$), con valores de 14.91 ± 1.68 N y 14.10 ± 1.94 N, respectivamente, mientras que sí se encontraron diferencias entre estos métodos para 'Manzanilla' (prueba t de Student, $p < 0.05$), con valores de 11.82 ± 1.05 N y 9.73 ± 1.61 N. Se encontró una correlación positiva de la fuerza de penetración del fruto con el peso del fruto (coeficiente de Pearson $p < 0.05$) para ambas variedades en los métodos de derribo manual, considerando que los frutos medidos se destinan a procesado en verde.

Los valores de fuerza de penetración en la zona no impactada del fruto mostraron variabilidad en el tiempo. Se encontraron diferencias significativas en ambas variedades entre las cuatro primeras semanas y la quinta y sexta semanas (ANOVA, post-hoc Tukey $p < 0.05$; Kruskal-Wallis, post-hoc Wilcoxon-Mann-Whitney Test $p < 0.05$). Observamos que la proporción de frutos con mayor madurez (mayor índice de Jaén), aumenta con el paso de las semanas (datos no mostrados). Además, el valor de su fuerza de penetración fue diferente entre frutos, excepto para aquellos con índices de 0 y 1 (ANOVA, post-hoc Tukey $p < 0.05$; Kruskal-Wallis, post-hoc Wilcoxon-Mann-Whitney Test $p < 0.05$), que disminuyó su valor a medida que aumentaba el índice de madurez.

3.3 Caracterización del color del fruto y del molestado

La Tabla 5 muestra los componentes del espacio de color CIELAB medidos con el colorímetro en las muestras de fruto analizadas. Los valores de la componente "a*" no mostraron diferencias entre las distintas campañas para cada variedad (prueba de Wilcoxon-Mann-Whitney, $p > 0.05$), a diferencia de las componentes "L*" y "b*", que fueron diferentes para cada variedad (prueba de Wilcoxon-Mann-Whitney, $p < 0.05$). Además, no se observaron diferencias significativas entre los distintos métodos de derribo ni entre los métodos de interceptación sobre superficie acolchada o fardo. Los valores de todas las componentes fueron superiores en 'Manzanilla de Sevilla' que en 'Hojiblanca' en ambas campañas. En ambas variedades, se midieron relaciones negativas entre las componentes 'a*' y 'b*' del espacio de color CIELAB (rho de Spearman, $p < 0.05$) con relaciones significativas relacionadas con la masa del fruto y los diámetros (coeficiente de Pearson, $p < 0.05$; rho de Spearman, $p < 0.05$) para 'Manzanilla de Sevilla'. Aunque este estudio sólo evaluó frutos verdes, al considerar diferentes índices de madurez, el análisis del color del fruto en el espacio RGB extraído de las fotografías muestra una tendencia de evolución del color desde el verde intenso hasta el negro (Figura 15). El color de los frutos a lo largo de las seis semanas estudiadas fue significativamente diferente (Kruskal-Wallis, $p < 0.05$) para cada uno de los canales (RGB), con diferentes valores de los canales rojo y verde para cada semana (Test post-hoc de Wilcoxon-Mann-Whitney con corrección de Holm, $p < 0.05$).

Tabla 5. Espacio de color CIELAB medido con el colorímetro en muestras de frutos impactados con el método de energía controlada (H) y los recolectados con los métodos de vibrador de ramas, sacudidor de ramas y vareo mediante acolchado en la interceptación

Método de derribo	Variedad	L*	a*	b*
Energía controlada (H) (zona con molestado)	'Hojiblanca'	52.9±2.9 c	-15.1±1.7 b	32.4±3.2 c
	'Manzanilla'	52.6±3.8 c	-11.5±2.9 c	30.3±3.8 d
Energía controlada (H) (zona sin molestado)	'Hojiblanca'	58.6±3.0 a	-19.2±1.1 a	38.6±2.3 a
	'Manzanilla'	62.1±2.5 b	-18.8±3.2 a	40.8±3.5b
Manual	'Hojiblanca'	59.5±3.0 a	-18.6±2.6 ad	37.8±2.8 a
	'Manzanilla'	62.4±2.3 b	-18.5±2.0d	39.4±3.0e
Recolección mecanizada (SC, BS, B)	'Hojiblanca'	59.0 ± 3.1 a	-19.0±1.3 a	36.5±4.6 f
	'Manzanilla'	61.9 ±4.5 b	-18.3±4.0d	38.4±2.9 a

Los valores mostrados son la media ± desviación estándar. Una letra diferente indica diferencias significativas entre filas de la misma columna (Kruskal-Wallis, $p < 0.05$; prueba de suma de rangos de Wilcoxon post hoc con método de ajuste de Holm, $p < 0.05$).

* El colorímetro se situó para medir en una zona aleatoria del fruto, independientemente de si la zona estaba molestada o no, excepto en el método de energía controlada, en el que se colocó justo encima de la zona impactada por la bola de acero.



Figura 15. Evolución del color (R) durante la maduración de la aceituna de mesa a lo largo de la campaña de recolección (mediana de los valores en espacio RGB para Hojiblanca y Manzanilla). (Para la interpretación de las referencias al color en la leyenda de esta figura, se remite al lector a la versión web de este artículo).

3.4 Caracterización del índice de molestado

- Índice de molestado 150 min después de la cosecha

El índice de molestado no siguió una distribución normal (Kolmogorov-Smirnov, $p < 0.05$). La Figura 16 muestra los valores medios obtenidos para las dos variedades y los tratamientos de recolección estudiados. Se observan diferencias significativas (Test de Wilcoxon-Mann-Whitney, $p < 0.05$) para las dos campañas entre 'Hojiblanca' y 'Manzanilla de Sevilla', siendo mayores los daños sufridos por 'Manzanilla de Sevilla'. Considerando exclusivamente el método de derribo, es decir, comparando los tratamientos de acolchado, no se encontraron diferencias significativas entre las variedades que utilizaron el método manual y el método de vareo (Kruskal-Wallis, $p < 0.05$; prueba post hoc de suma de rangos de Wilcoxon con ajuste de Holm, $p < 0.05$). Sin embargo, se encontraron diferencias significativas entre las variedades que utilizaban el vibrador de ramas (BI = 0.03 para 'Hojiblanca' y BI = 0.33 para 'Manzanilla') o el sacudidor de ramas (BI = 0.24 para 'Hojiblanca' y BI = 1.59 para 'Manzanilla'), con diferencias significativas entre ambos métodos para la misma variedad (prueba post hoc de suma de rangos de Wilcoxon con ajuste de Holm, $p < 0.05$). En cuanto al método de interceptación, es decir, comparando el mismo método de derribo entre acolchado y fardo, se encontraron diferencias para todos los sistemas, que fueron significativamente mayores con una interceptación sobre fardo (Kruskal-Wallis, $p < 0.05$; prueba post hoc de suma de rangos de Wilcoxon con ajuste de Holm, $p < 0.05$). Los valores más altos se encontraron utilizando el sacudidor de ramas para ambas campañas y variedades, con valores mayores en 'Manzanilla de Sevilla' (BI = 1.59 para acolchado y BI = 5.85 para fardo).

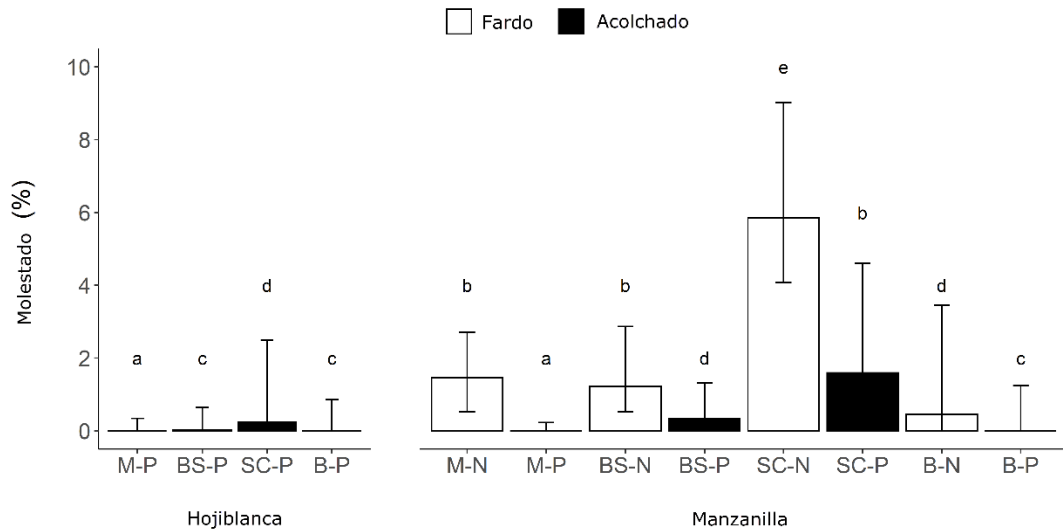


Figura 16. Índice de molestado para cada método de derribo de frutos (M: manual a mano, BS: vibrador de ramas, SC: sacudidor de ramas, B: vareo manual) e interceptación (N: fardo, P: acolchado) y para cada variedad de aceituna. Los valores indicados representan la mediana y el rango intercuartílico (Kruskal-Wallis, $p < 0,05$; prueba de suma de rangos de Wilcoxon post hoc con método de ajuste de Holm, $p < 0,05$).

Se realizó una clasificación nominal colocando límites de índice de molestado ($BI = 0$, $0 < BI < 1$, $1 < BI < 3$, $3 < BI < 5$, $BI > 5$) para comparar el nivel de daño estudiado por otros autores que establecieron las categorías de molestado 'sin daño', 'daño leve', 'moderado', 'severo' y 'corte y mutilación' (Jimenez-Jimenez et al., 2013b). Sin embargo, esto es solo una propuesta de umbrales ya que estos autores utilizaron una clasificación visual por lo que no cuantificaron el área de molestado utilizada para definir los límites. La Figura 17 muestra la distribución del molestado en los frutos muestreados con la clasificación propuesta. Con los umbrales definidos, se obtuvo una distribución del nivel de daños o molestado causado por cada método de derribo e interceptación estudiado (Figura 18).

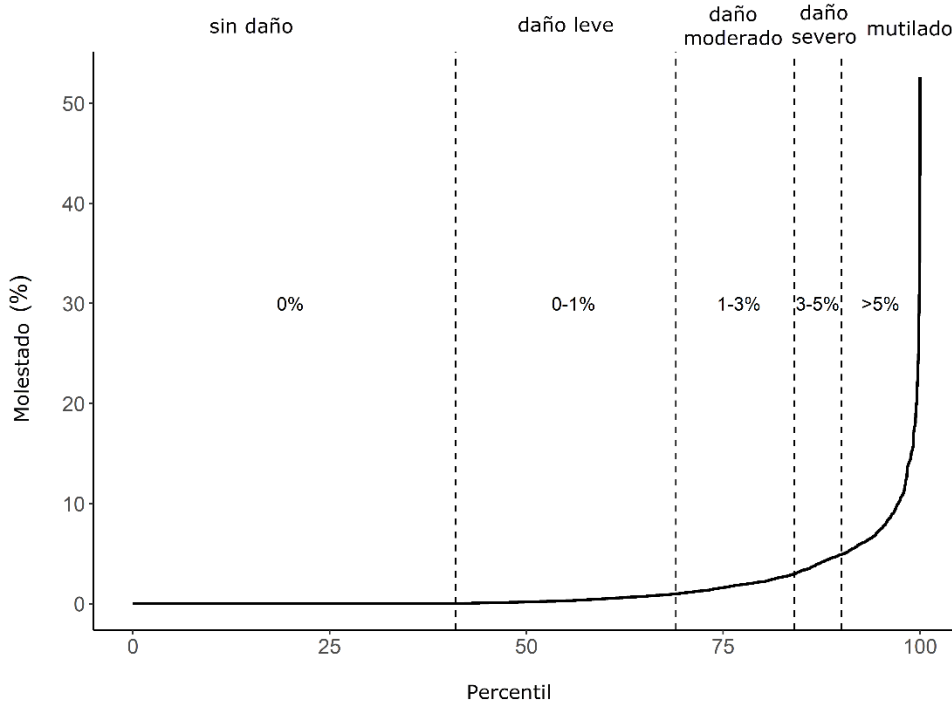


Figura 17. Distribución de los valores del molestado. Las líneas de puntos verticales delimitan cada categoría de daños

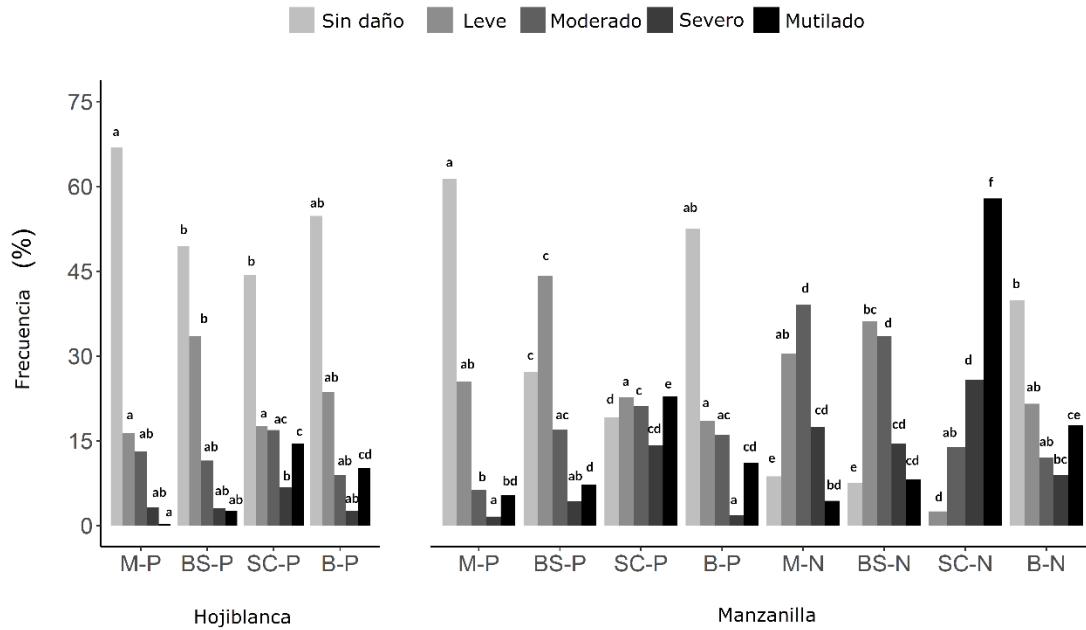


Figura 18. Frecuencia de la categoría de daños para cada tratamiento de derribo de frutos (M: manual a mano, BS: vibrador de ramas, SC: sacudidor de ramas, B: vareo manual) e intercepción (N: fardo, P: acolchado) y para cada variedad de olivo. Una letra diferente indica diferencias significativas entre tratamientos en la misma categoría de daños (prueba Z de proporciones por pares de dos muestras con método de ajuste de Holm, $p < 0.05$).

- Índice de molestado y su evolución en el tiempo

La Figura 19 muestra la evolución temporal del índice de molestado desde el momento en que el método controlado (H) impactó en la aceituna. Los valores del índice de molestado en los distintos momentos posteriores al impacto mostraron diferencias significativas (prueba t de Student, $p < 0.05$; prueba de Wilcoxon-Mann-Whitney, $p < 0.05$) entre variedades. Los valores medios del índice de molestado se ajustaron a una función logarítmica en relación con el tiempo transcurrido tras el impacto. La Figura 20 ilustra las diferencias de color de las manchas de molestado entre los canales de color RGB a lo largo del tiempo. Se observaron diferencias de color entre las dos variedades de frutos a lo largo del tiempo en los canales rojo y verde (prueba de Friedman $p < 0.05$), pero no en el canal azul. Los mayores cambios a lo largo del tiempo se produjeron en el canal verde, donde los valores disminuyeron con mayor pendiente en 'Manzanilla de Sevilla'.

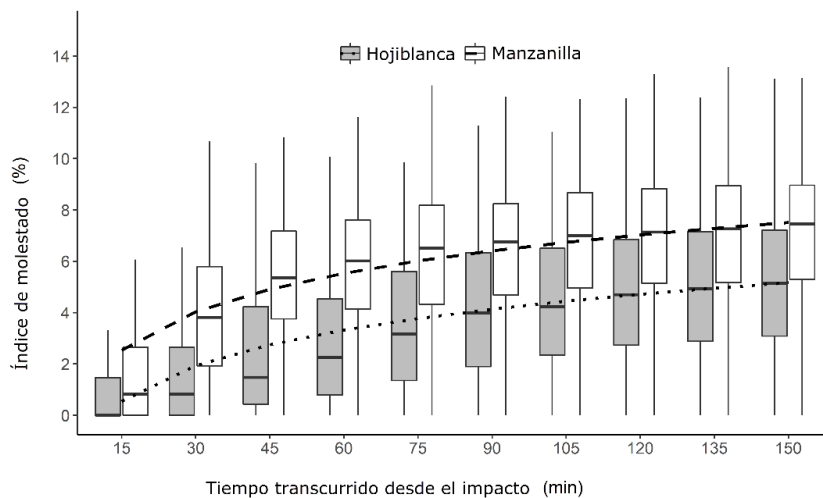


Figura 19. Evolución temporal del color del molestado en el espacio de color RGB tras el impacto para las variedades 'Hojiblanca' (gris) y 'Manzanilla' (blanco) medida a partir de las imágenes

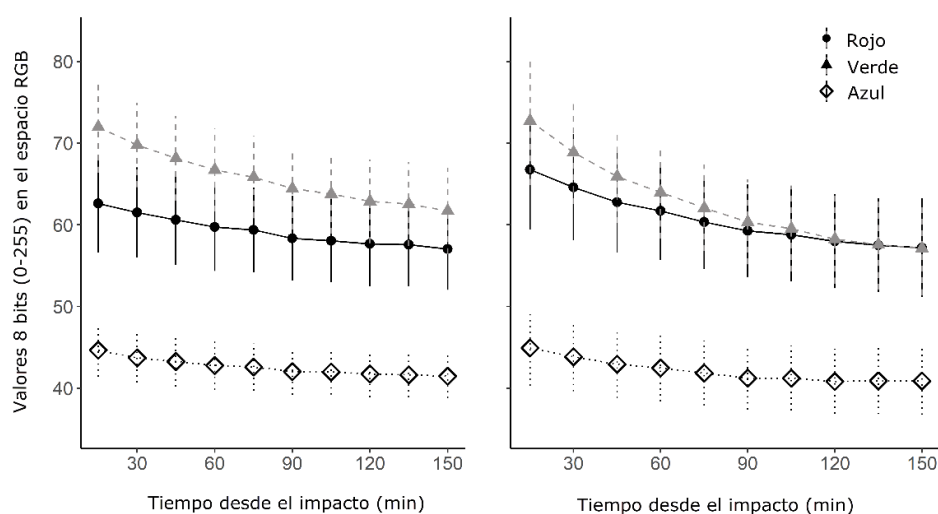


Figura 20. Evolución temporal del color de las magulladuras en el espacio de color RGB, tras el impacto, para las variedades "Hojiblanca" (izquierda) y "Manzanilla" (derecha), medido a partir de las imágenes. Los puntos indican los valores medios y las líneas superior e inferior indican la desviación estándar

▪ Localización del molestado en la superficie del fruto

La Figura 21 muestra las diferencias en el índice de molestado entre el análisis de una sola imagen que capta parcialmente la superficie del fruto y el sistema propuesto, que capta la superficie completa. Los métodos basados en vibradores de ramas y recolección manual mostraron diferencias significativas entre el índice de molestado determinado a partir de una sola fotografía o de toda la perspectiva en verdadera magnitud. Por el contrario, los métodos de recolección con sacudidor de ramas y vareo manual no mostraron diferencias significativas. En general, cuando se considera la imagen de la superficie extendida del fruto, se produce un notable aumento del porcentaje de molestado, una mediana del 140%, considerando que el 100% es el molestado estimado a partir de una sola fotografía cenital sin procesar, aunque en algunos casos existe una desviación elevada.

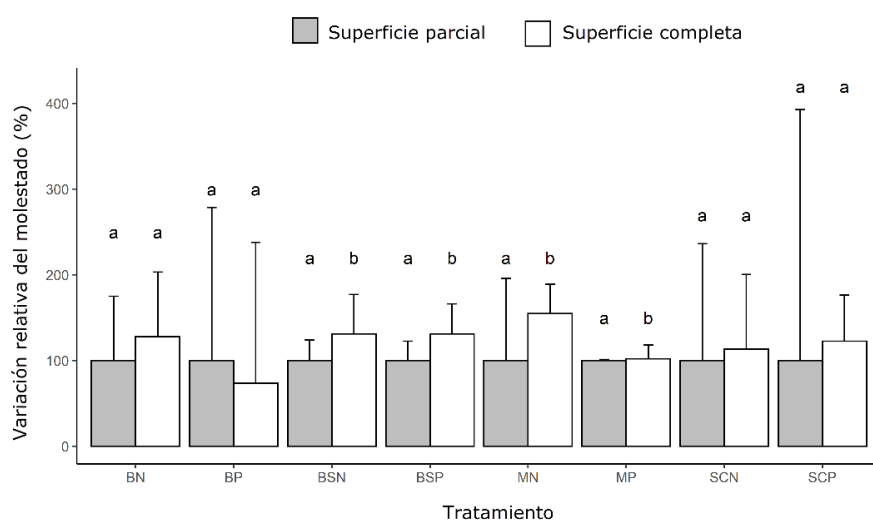


Figura 21. Variación relativa del molestado para cada tratamiento de derribo del fruto (M: manual a mano, BS: vibrador de ramas, SC: sacudidor de ramas, B: vareo manual) e interceptación (N: fardo, P: acolchado) entre un fruto evaluado parcialmente (gris) y el fruto completo (blanco). El molestado parcial se fijó en el 100%. Letras distintas indican diferencias dentro del mismo tratamiento entre las distintas superficies observadas (prueba de suma de rangos de Wilcoxon Mann-Whitney, $p < 0.05$).

4. Discusión

Dentro de cada variedad, el tamaño del fruto derribado no estuvo relacionado con el método de derribo utilizado, excepto en el caso del derribo manual mediante varas (Tabla 3). La base de este método es el impacto sobre las ramas portantes, que tiene una mayor incidencia sobre los frutos de mayor tamaño y, por tanto, una menor relación fuerza por masa de desprendimiento del fruto (Famiani et al., 2014). Las observaciones mostraron que la circularidad de los frutos cosechados es significativamente diferente con métodos manuales (manual y vara) que con métodos mecanizados (vibrador de ramas y sacudidor de ramas) para la misma variedad. En casi todos los casos, el tamaño y la forma de las variedades eran significativamente diferentes debido a su propia fisiología (Belaj et al., 2002). Existió una fuerte relación entre la geometría y la masa del fruto, que otros autores ya han indicado (Ponce et al., 2018). El número de manchas en el fruto recolectado mostró la clara diferencia entre la recolección manual y mecanizada en el proceso de derribo del fruto, además de indicar cómo la interceptación con fardo aumenta la cantidad de daños (Tabla 4), sugiriendo la necesidad de abordar la interceptación del fruto con sistemas de recolección acolchados (Plasquy et al., 2019; Ravetti and Robb, 2010). El diámetro medio de las manchas provocadas por los distintos métodos parece ser un factor determinante para su caracterización, dependiendo exclusivamente del método de derribo, observándose diferencias significativas para 'Manzanilla de Sevilla' y 'Hojiblanca' entre los métodos manual, vibrador de ramas y sacudidor de ramas, y por variedades (Tabla 4). Para la variedad 'Manzanilla de Sevilla', si comparamos los diámetros obtenidos con superficie acolchada frente a interceptación con fardo, observamos que cuando se utiliza acolchado, el diámetro se reduce para todos los métodos de recolección, excepto para el vareo, donde el diámetro se mantiene muy similar. Además, cuando se utiliza la interceptación con fardo se produce un cambio en la forma de la mancha, indicado por una disminución de la circularidad, mientras que las manchas provocadas por el sacudidor de ramas y la vara (Tabla 4) son más alargadas. Esto puede deberse al funcionamiento de estos últimos sistemas, que tienen contacto directo de las varas con los frutos.

La firmeza del fruto es un atributo de calidad de las aceitunas de mesa. Los valores altos de firmeza favorecen una disminución del daño en el fruto al tener menores valores de deformación al impacto, que en última instancia influyen en la distribución del daño celular del fruto (Jiménez et al., 2016). Los resultados obtenidos confirmaron que 'Hojiblanca', con valores de firmeza más elevados, sufrió menos daños en comparación con 'Manzanilla de Sevilla'. Por tanto, el grosor de la cutícula puede ser un indicador de los cultivos de aceituna de mesa aptos para la recolección mecánica (Goldental-Cohen et al., 2019). En este trabajo, no se observaron diferencias dependientes del método de recolección para la firmeza del fruto en la zona de moleestado, sin embargo, sí se observaron diferencias en la firmeza del fruto recolectado a mano frente a otros métodos de recolección, como han observado otros autores (Morales-Sillero et al., 2014). En el caso de 'Manzanilla de Sevilla', con mayor proporción de pulpa-hueso, se observaron diferencias al utilizar el vibrador de ramas y el sacudidor de ramas, y son los frutos recolectados con este último método los que mostraron menor firmeza. Parece que el fruto con un índice de moleestado más alto, como en el caso de la recolección con el sacudidor de ramas, tuvo una firmeza más baja, aunque no se obtuvieron correlaciones significativas. Las diferencias en la firmeza a medida que avanza la temporada de recolección pueden indicar que los frutos aumentan de tamaño y, tras la primera fase de crecimiento, continúa la concentración de solutos y la pérdida de agua, lo que se traduce en una mayor susceptibilidad de la piel del fruto a los daños mecánicos (Kılıçkan and Güner, 2008). Por ello, es tan importante conocer el periodo óptimo de recolección de este fruto, ya que el objetivo es obtener frutos con mayor tamaño y rigidez, pero sin excesivas

fuerzas de desprendimiento del fruto que reduzcan la eficiencia de recolección de los sistemas mecánicos.

Los colores de los frutos medidos en el espacio CIELAB fueron ligeramente diferentes entre variedades, lo que indica que el color puede ser otro factor de discretización interesante entre variedades. Los valores más altos observados para la variedad "Manzanilla de Sevilla" indican frutos más brillantes y tonos verde paja, mientras que los valores más bajos de la variedad "Hojiblanca" dan como resultado frutos más oscuros con tonos verde azulados. Al pasar de recolección manual a mecanizada, los valores del canal 'a*' aumentaron y los de los canales 'L*' y 'b*' disminuyeron, mostrando una diferencia significativa en el canal 'b*', en concordancia con lo reportado por Morales-Sillero et al., (2014). Esta variación, principalmente en el tono verde del fruto, puede ser resultado del mayor número de manchas marrones debido al uso de la cosecha mecánica, que produce un color significativamente diferente en comparación con el resto del fruto (Riquelme et al., 2008), como se observa en el método de energía controlada (H) (Tabla 5). Esto también sugiere que el color es un parámetro de control interesante para medir el nivel de daño en los frutos como una función que considera los porcentajes de verde o pardeamiento, según lo informado por Goldental-Cohen et al., (2019). Sin embargo, es importante tener en cuenta que esto sólo es posible para frutos en un estado de madurez específico, ya que el color evoluciona a lo largo de la temporada de cosecha (Figura 15), según lo informado por Sola-Guirado et al., (2020a).

La variedad 'Manzanilla de Sevilla' fue más susceptible al molestado y presentó valores más altos de índice de molestado en todos los casos, tal y como informaron Jiménez-Jiménez et al., (2013a) en un ensayo de caída. Se observaron diferencias en el índice de molestado entre los sistemas de recolección estudiados y para las variedades, siendo claramente superior para el sacudidor de ramas debido al contacto directo de las varas con el follaje. Así pues, el índice de molestado también puede ser un parámetro de control para evaluar el sistema de recolección utilizado para el fruto. Es importante señalar que este índice considera el área de fruto dañado en relación al área del fruto, pero no la profundidad medida por el volumen de fruto molestado, que requeriría otro tipo de técnicas de evaluación (Jiménez-Jiménez et al., 2013a; Morales-Sillero et al., 2014). El índice de molestado está relacionado con el nivel de energía aplicado sobre el fruto, de forma que menores niveles de energía darán lugar a menores niveles de daño (Jiménez-Jiménez et al., 2012). Sin embargo, los niveles energéticos requeridos para la aceituna de mesa son superiores a los utilizados para la recolección de aceituna para aceite (Sola-Guirado et al., 2014), debido a una recolección más temprana (Famiani et al., 2014). De hecho, para mejorar la eficiencia de la cosecha, a menudo es necesario utilizar una combinación de sistemas, como sacudidores de tronco con sistemas auxiliares de cosecha (Zipori et al., 2014). Además, cuando la energía recibida para desprender el fruto se suma a la energía potencial de la caída, el daño es aún mayor, como se ha observado en este trabajo cuando la caída se produce sobre un fardo (Figura 16). La relación entre el aumento de molestado y la altura de caída, y con la superficie de contacto (Saracoglu et al., 2011) indica de nuevo la importancia de estudiar los sistemas de interceptación en la recolección de fruta fresca (Hussein et al., 2020), especialmente en 'Manzanilla de Sevilla'. Más aún cuando se utilizan sistemas de manejo y limpieza en cosechadoras, que provocan un aumento de los daños en los frutos (Sola-Guirado et al., 2020b). La Figura 18 muestra la diferencia cuantitativa de daños por categorías según la severidad. Con la interceptación mediante fardo disminuyen los porcentajes de frutos sanos y ligeramente dañados y aumentan los del resto de categorías respecto a la interceptación con acolchado, lo que es especialmente apreciable para el sacudidor de ramas. Esta clasificación del índice de molestado según la severidad del daño puede ser de gran interés ya que con niveles bajos de daño es posible

revertir el pardeamiento mediante un pretratamiento con una solución diluida de NaOH, el uso de frío (Campus et al., 2018; Zipori et al., 2014) o una atmósfera de nitrógeno (Segovia-Bravo et al., 2012). De esta forma, se pueden minimizar daños menores, y es posible reducir otros daños en postcosecha, tal y como informan Zipori et al., (2021). Es importante conocer cómo evolucionan los daños en el tiempo para aplicar los tratamientos postcosecha con criterio. En la Figura 19 se observa cómo, aproximadamente a los 150 min de la recolección, el área de daño visible deja de crecer y se estabiliza, coincidiendo con lo reportado por Jimenez-Jimenez et al., (2013b), aunque el daño sigue evolucionando internamente hasta las 24 h (Jiménez et al., 2016). 'Hojiblanca' sigue la misma tendencia, aunque desde el inicio del impacto su área dañada es menor. También observamos una evolución del color de la mancha, que comienza siendo verde oscuro y se transforma en marrón (Figura 20, en espacio RGB) (Tabla 5, en espacio CIELAB). Estos cambios de color también difieren entre variedades, con una mayor incidencia en los canales verde y rojo del espacio RGB. Todo ello indica que la primera hora es clave para reducir la superficie dañada mediante la aplicación de los tratamientos correspondientes (Segovia-Bravo et al., 2011).

Parte del objetivo de este trabajo era caracterizar el patrón de molestado de las aceitunas verdes recolectadas. Es una tarea compleja cuantificar la cantidad real de molestado externo en un fruto o lotes de frutos a partir de una única fotografía utilizando visión por ordenador, ya que sólo se percibe una parte de la superficie y, además, ésta es una proyección bidimensional. Este último problema puede resolverse parcialmente corrigiendo la proyección (Mon and ZarAung, 2020). Para maximizar la superficie muestreada de fruto, es habitual utilizar espejos (Reese et al., 2009), más de una cámara (Xul et al., 2009) o mecanismos de rotación (Cubero et al., 2014). Estos métodos mejoran el valor estimado respecto al real, permitiendo analizar toda o casi toda la superficie del fruto. En este trabajo se utilizó un mecanismo giratorio para observar toda la superficie de la aceituna con el fin de estimar qué porcentaje de información se pierde al utilizar una única fotografía. Las diferencias encontradas para los métodos de recolección ensayados pueden deberse a la forma en que desprenden el fruto. Con el sacudidor de ramas y el vareo, los impactos sobre la aceituna se pueden producir por contacto directo, generando un daño puntual más heterogéneo, y el valor estimado con una sola fotografía puede estar más condicionado por la parte de la aceituna que queda visible. Sin embargo, el vibrador de ramas, que actúa directamente sobre la rama y provoca el desprendimiento del fruto por transmisión de la vibración, puede producir daños causados por el choque de unos frutos contra otros o contra las ramas y hojas, más homogéneos y distribuidos por toda la superficie del fruto. Es importante señalar que el porcentaje de molestado es una medida relativa y depende de la cantidad de daños, es decir, de la suma de las distintas áreas de molestado divididas por la superficie del fruto muestreado. Por esta razón, el porcentaje de molestado de fruto obtenido a partir de una sola fotografía puede ser superior al obtenido a partir de la composición de la superficie extendida, lo que sólo ocurre para el método de vareo con acolchado. Por lo tanto, sería aconsejable multiplicar el valor de molestado obtenido a partir de una sola imagen por un valor superior a 1 para proporcionar un valor más realista del molestado del fruto.

En cuanto a los requisitos y tiempo de procesado de la imagen, el método utilizado para obtener la segmentación de las zonas de molestado requiere un alto componente manual y, por tanto, un elevado consumo de tiempo. El uso de técnicas de aprendizaje automático mejora los tiempos de procesado, pero generan incertidumbre (Sola-Guirado et al., 2020a). Sin embargo, el método manual de análisis es el más adecuado para obtener una mayor precisión de los resultados en la caracterización del molestado del fruto. En este aspecto, el espectro utilizado para el análisis es determinante ya que los resultados obtenidos en aceitunas pueden diferir al utilizar el color en espacio RGB (Jimenez-Jimenez et al., 2013a), una combinación de HSV y RGB (Riquelme et al.,

2008) u otro espectro como el infrarrojo cercano (Jiménez-Jiménez et al., 2012; Stella et al., 2015).

Los resultados obtenidos en este estudio son especialmente interesantes para la toma de decisiones en pre o postcosecha en la gestión de explotaciones olivareras. Por ejemplo, desplegados en sistemas embarcados en maquinaria, algunos de los parámetros caracterizados en este trabajo y determinados por sistemas de visión artificial podrían realizar estimaciones de cosecha sin necesidad de pesaje, asignando una unidad de masa por fruto en función de parámetros geométricos o varietales (Tabla 3). Otra aplicación, en sistemas de procesado industrial, podría ser la determinación de la cantidad y procedencia de los daños en función del sistema de recolección empleado. La influencia de los factores que intervienen en el proceso podría servir para mejorar los nuevos sistemas mecanizados de recolección y, además, ayudar al agricultor a elegir el más adecuado según sus condiciones. Además, puede influir en el procesado industrial, ya que facilita la mejora del aspecto visual de la aceituna tras la recolección, en función del nivel de daño causado y del momento del transporte. Las normas de comercialización actuales para determinados parámetros, como los defectos externos fijados por la tolerancia, aún no son exigentes, pero estos parámetros evolucionarán y, casi con toda seguridad, requerirán más exactitud en el futuro. Por ello, la aplicación de técnicas basadas en visión por computador para obtener el mayor número de parámetros de la aceituna (Guzmán et al., 2015; Ponce et al., 2018; Puerto et al., 2015; Satorres Martínez et al., 2018) será una realidad en el ámbito industrial en los próximos años.

Capítulo 4

Estimación del peso del fruto recolectado mediante sensores de medición de distancia por volumen ocupado: Un caso de estudio con aceitunas almacenadas en big box

1. Introducción

Los monitores de rendimiento son dispositivos ya consolidados, a nivel comercial, en las cosechadoras de grano y que han sido ensayados en otras máquinas, como las vendimiadoras, aunque en los árboles su implantación es más complicada. Estos se basan, normalmente, en células de carga, placas de impacto o barreras láser para determinar, en tiempo real, el peso de producto cosechado, siendo las células de carga, uno de los principales métodos de medición, ya que son sistemas directos y no requieren de complejas conversiones. Sin embargo, presentan varias desventajas, como la necesidad de una instalación precisa, y problemas, como los de precisión y ruido en la señal durante el uso en dinámico debido a la orografía, al movimiento del fruto y a las aceleraciones/desaceleraciones de la maquinaria (Maja and Ehsani, 2010).

Como alternativa a los métodos tradicionales de medición, en este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de pesaje basado en tecnología ToF (Time of Flight) que se aplicará a un caso práctico de recolección de aceituna de mesa y carga en *big box* (Figura 22). El objetivo es evaluar su viabilidad para la estimación continua de la cosecha mediante la medición del volumen del fruto en comparación con el pesaje directo. Para ello, se comparan un sistema experimental, compuesto por un *array* 2D de sensores ToF de bajo coste, y un sistema comercial basado en una cámara 3D, con un sistema de pesaje tradicional basado en células de carga. Los nuevos sistemas estudiados podrían constituir un avance en los sistemas de pesaje como alternativa a los existentes, sin depender de complejos algoritmos de estimación de frutos o procesamiento de señales. Los resultados obtenidos podrían aplicarse a otros sistemas de almacenamiento y a otros cultivos.

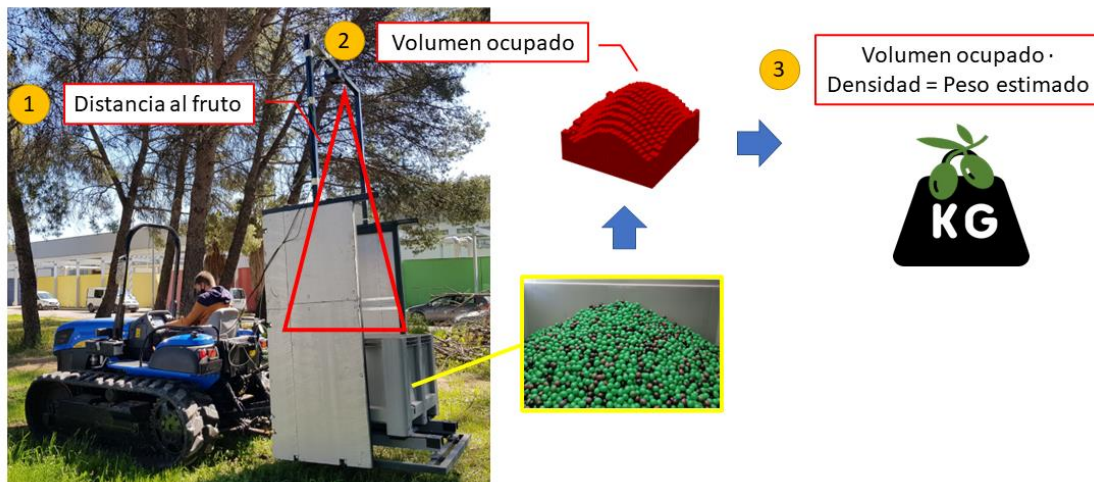


Figura 22. Metodología expuesta para la estimación del peso mediante un monitor de rendimiento basado en sensores ToF

2. Materiales y métodos

2.1 Estructura del sistema de almacenamiento

Para almacenar el fruto recolectado se utilizó un *big box* estándar de $1100 \times 900 \times 630$ mm, que permite el paletizado y una fácil manipulación con remolques o carretillas elevadoras. Para estimar el volumen de fruto almacenado, se colocaron encima de la caja dos sistemas de medición de distancias, uno comercial (descrito en el apartado 2.2.1) y otro experimental (descrito en el apartado 2.2.2). También se instalaron varios elementos auxiliares de control y medición como un luxómetro o un sistema GNSS, detallados en la Sección 2.4, para evaluar el rendimiento

de las diferentes tecnologías utilizadas para el monitor de cosecha (descrito en la Sección 2.3) (Figura 23). Todos los sensores se montaron en una estructura enganchada al tripuntal trasero de un tractor y se alimentaron con la batería del tractor para realizar pruebas en condiciones reales de cosecha.



Figura 23. Estructura del sistema comercial montado en el tractor para la instalación de los sistemas de medida y elementos auxiliares. 1.-Luxómetro, 2.-Big box, 3.-Acelerómetro, 4.-Microcontrolador, 5.- GNSS, 6.-Célula de carga.

2.2 Estimación del volumen de fruto recolectado

2.2.1 Sistema comercial para la medición de distancias

El sistema comercial utilizado en este trabajo para la medición de distancias fue una cámara 3D que consta de dos elementos principales, una fuente de luz infrarroja de 840 nm (O3M950, IFM electronic, Alemania) y un sensor receptor (O3M151, IFM electronic, Alemania). La fuente de iluminación consistía en una matriz de 1024 emisores de luz infrarroja (matriz de 64×16) que emiten pulsos de corta duración para iluminar la escena. El sensor capta los reflejos de estos pulsos y los transforma en distancia mediante el método ToF. Según la ficha técnica del fabricante, el sensor tiene un rango de medición de 0.2-60 m en función de la reflectividad del material objetivo, un error de 1 cm/m medido y un campo de visión (FoV) de 70° en el eje x y 23° en el eje y . Las medidas obtenidas por el sensor corresponden a las coordenadas x , y , y z del punto del espacio donde impacta cada uno de los láseres con respecto al sensor, así como la amplitud o intensidad de estos. Debido a la asimetría del FoV, el sensor y la fuente de luz se instalaron sobre la estructura a una altura de 3 m para cubrir todo el *big box*, en una posición centrada respecto a su fondo y perpendicular a él (Figura 24). En esta posición el número de emisores útiles o píxeles era de 350 (array de 25×14).



Figura 24. Prototipo de monitor de rendimiento desarrollado con el sistema comercial sobre una estructura metálica y big box para almacenar el fruto (izquierda). Detalle de la cámara 3D (derecha).

2.2.2 Sistema experimental para la medición de distancias

El sistema experimental desarrollado consiste en un conjunto de varios sensores ToF de bajo coste (VL53L1X, ST Microelectronics, Suiza). Estos se seleccionaron por su bajo coste de adquisición y sus características adecuadas en cuanto a alcance y precisión. Cada sensor consta de un emisor con una longitud de onda de 940 nm y un receptor independiente, lo que permite medir distancias de hasta 4 m con un campo de visión cónico de 27° . Para cubrir el volumen del sistema de almacenamiento completo, empleamos una disposición de matriz 2D de 12 sensores (3x4). Estos sensores se instalaron a 200 mm de distancia y se colocaron perpendiculares al *big box* a una altura de 1700 mm desde el fondo de la caja. Debido a la alta sensibilidad de los sensores a la iluminación externa, la estructura se cubrió con una lona (Figura 25).



Figura 25. Prototipo de monitor de rendimiento desarrollado con el sistema experimental sobre una estructura metálica y un big box para almacenar el fruto (izquierda). Detalle del conjunto de sensores ToF (derecha).

2.3 Elementos auxiliares

En el caso del sistema experimental, cada sensor estaba conectado a un microcontrolador Arduino (Arduino Nano v3, Smart Projects, Italia) que leía los valores de distancia con una frecuencia de refresco de 500 ms y los enviaba a una red CAN mediante un mensaje, para lo cual se utilizó un módulo CAN (MCP2515, Microchip, EE. UU.). Cada mensaje CAN constaba de un identificador que correspondía a un único sensor y el valor de la distancia. Los mensajes eran recibidos por un microcontrolador (ESP32, Espressif, China) que los enviaba al PC encargado de ejecutar los algoritmos a través del puerto Ethernet.

Tanto el sistema comercial como el experimental compartían también otros elementos auxiliares, como un sistema de pesaje por célula de carga. Este sistema proporcionó una medida fiable en ensayos estáticos para su comparación con las medidas de los sistemas desarrollados en este trabajo. Por otro lado, en ensayos dinámicos, permitía verificar la diferencia entre las células de carga y los sistemas ToF estudiados. El sistema de pesaje fue una báscula (PCE-SW 1500 N, PCE Instruments, España) formada por células de carga con un rango de pesaje máximo de 1500 kg. Otros elementos empleados, como un amplificador para las células de carga, un acelerómetro, luxómetros y un sistema GNSS, contaban también con sus respectivos microcontroladores Arduino y conexión a la red CAN. Para amplificar y leer las medidas del sistema de pesaje se utilizó un módulo amplificador (HX711, SparkFun Electronics, Estados Unidos) con comunicación serie a través del bus I²C (Inter-Integrated Circuit). El acelerómetro usado fue un acelerómetro capacitivo independiente de 3 ejes (ADXL345, Adafruit, Nueva York) con un rango de medida ajustado a ± 2 g y comunicación vía I²C. El luxómetro (BH1750, Adafruit, Nueva York) tenía un rango de medida máximo de 100000 lx y comunicación I²C. El sistema GNSS (Neo-6 M, Ublox, Suiza) para georreferenciar el sistema de pesaje tenía una precisión de localización de 2.5 m, 0,1 m/s en la obtención de velocidad y 0.5° en la orientación. La comunicación se realizó mediante UART (receptor-transmisor asíncrono universal), y los parámetros del satélite de latitud, longitud, altitud y velocidad se obtenían mediante el protocolo NMEA (National Marine Electronics Association). Finalmente, todos los parámetros y medidas recibidos por el receptor CAN se enviaron a la aplicación software desarrollada (descrita en el apartado 2.4) mediante conectividad Wi-Fi.

2.4 Estimación del peso a partir del volumen medido

Se desarrolló una aplicación informática en Microsoft.NET para realizar la estimación del volumen, V , según dos algoritmos que se explican a continuación y que fueron diferentes para cada sistema. Para realizar la estimación, fue necesario introducir el número de medidas o píxeles a utilizar por cada algoritmo. En el caso del sensor comercial fue de 25x14 píxeles (350 medidas) y en el caso del experimental de 3x4 sensores (12 medidas), como se ha explicado anteriormente. Cada uno de estos píxeles registraba un valor instantáneo de distancia. La interfaz de la aplicación permitía la introducción manual del parámetro de densidad del fruto recolectado, ρ , para estimar el peso calculado como producto del volumen instantáneo y la densidad. En el apartado 2.6.6 se explica la determinación de este parámetro.

2.4.1 Algoritmo para el sistema experimental

Dado que se dispone de un número reducido de medidas (3x4) para el cálculo del volumen, se realizó una aproximación mediante interpolación polinómica con los puntos conocidos (Figura 26 - paso 1). Estos puntos tienen las coordenadas cartesianas de la posición de los sensores con respecto a los lados longitudinal y transversal del *big box*; su altura es la diferencia entre las medidas de distancia de los sensores y la altura con respecto al fondo del *big*

box. Para lograr la aproximación, primero se realizó el cálculo de tres polinomios de tercer grado $P(x_i)$ (uno por cada fila de sensores) que pasaban por los cuatro puntos conocidos en la dirección longitudinal (i). A continuación, para mayor precisión, se realizaron n divisiones equidistantes en sentido longitudinal, obteniendo n puntos auxiliares en el polinomio. En este caso, se utilizaron intervalos de 10 mm, con lo que se obtuvieron 110 puntos auxiliares (h_{ij}). A continuación, se realizó el mismo procedimiento en la dirección transversal (j) del big box. En este caso, al igual que anteriormente, se calcularon 110 puntos auxiliares por fila, y en la dirección transversal con 3 mediciones de distancia, fue necesario calcular 110 polinomios de segundo grado $Q(x_j)$. A continuación, se volvieron a realizar divisiones en la dirección transversal del big box cada 10 mm y, sustituyendo en los polinomios, se obtuvieron otros n puntos auxiliares (h_{ij}), en este caso fueron 90. Se obtuvo así una malla de distancias interpoladas (9900), a partir de las medidas realizadas por los 12 sensores (Figura 26 - paso 2). El cálculo del volumen instantáneo, V , es la suma de los volúmenes de los prismas formados por cada punto, donde el área ($x \cdot y$) es el área de las divisiones/intervalos ($10 \times 10 \text{ mm}^2$) y la altura de cada uno es la medida de distancia de cada uno de los puntos calculados (h_i, h_j) (1).

$$V = \sum_{n=1}^{9900} [(x \cdot y) \cdot (h_{i,j})] \quad (1)$$

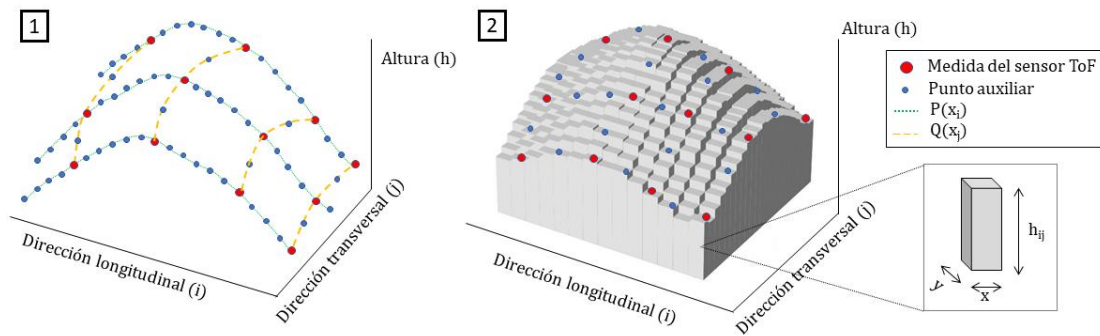


Figura 26. Algoritmo aplicado para el cálculo de volúmenes en el sistema experimental. No se han representado todos los puntos auxiliares y polinomios calculados. El paso 1 corresponde al cálculo de los polinomios en ambos ejes para generar los puntos auxiliares. El paso 2 representa los prismas de cada punto (sensor y medidas auxiliares) para el cálculo del volumen total.

2.4.2 Algoritmo para el sistema comercial

Para este sistema la metodología de cálculo del volumen es similar a la mostrada en la Figura 26-2. En este caso no se necesitaron puntos auxiliares, sino que se utilizaron directamente las medidas de píxeles de la cámara 3D. El volumen instantáneo, V , era la suma de los volúmenes de los prismas formados por cada píxel (2) (Figura 26). Cada prisma tiene un área ($x \cdot y$) que es el cociente entre las dimensiones del big box en cada eje (1100 y 900) y el número de píxeles utilizados para cada uno (25 y 14). Por tanto, el área es un valor fijo. La altura de cada prisma es la diferencia entre las distancias respectivas medidas por cada píxel a la zona donde hay fruto, h_n , y la altura, h , de la cámara 3D con respecto al fondo del big box. La altura h es un valor fijo.

$$V = \sum_{n=1}^{350} [(x \cdot y) \cdot (h - h_n)] \quad (2)$$

2.5 Ensayo de caracterización y evaluación de la medición de la distancia

2.5.1 Obtención del campo de visión (FoV) de ambos sistemas

El FoV se calculó experimentalmente dado que el valor de la ficha técnica del fabricante se obtuvo en condiciones de ensayo específicas y, en la práctica, los límites suelen ser inferiores.

Además, este parámetro era crítico, ya que puede influir en la medición de las paredes del *big box*. Los sensores que integraron el array del sistema experimental y la cámara 3D del sistema comercial se instalaron sobre un trípode y se colocaron perpendiculares a una pared blanca lisa ($L^*=95.17$, $a^*=-0.12$, $b^*=0.55$) para determinar el campo de visión. Posteriormente, se introdujo en el campo de visión un objeto cuadrado de 100x100x50 mm de un color conocido ($L^*=94.23$, $a^*=0.09$, $b^*=-0.97$). Los puntos para la determinación del cono se registraron tras la detección de variaciones en las mediciones tomadas por cada sistema en comparación con las mediciones en ausencia del objeto. Esta prueba se realizó a diferentes distancias de la pared dentro de un rango de 50-250 cm para el sistema experimental y de 50-350 cm para el sistema comercial. La iluminación media registrada fue de 121.43 ± 10.86 lx en ambos casos.

2.5.2 Obtención de la precisión y repetibilidad de ambos sistemas (distancia y volumen)

Para determinar la exactitud de la distancia medida por los sensores, ambos sistemas se colocaron sobre un trípode perfectamente paralelo a una pared blanca lisa ($L^*=95.17$, $a^*=-0.12$, $b^*=0.55$). Las mediciones registradas con los sensores se compararon con las obtenidas mediante un distanciómetro láser (GLM50, Bosch, Alemania). En el caso del sistema comercial, se registraron cada uno de los 1024 píxeles y se representaron gráficamente para comprobar la variabilidad de las mediciones desde el centro hasta los bordes del FoV. Posteriormente, se realizaron mediciones de distancia en un intervalo de 50 a 250 cm y de 50 a 350 cm entre la pared y el sensor para el sistema experimental y el comercial, respectivamente. El nivel medio de iluminación registrado durante la prueba para ambos sistemas fue de 121.25 ± 10.07 lx.

Para determinar la precisión del algoritmo en el cálculo del volumen, se probaron ambos sistemas utilizando una superficie de relleno blanca uniforme ($L^*=91.75$, $a^*=-0.88$, $b^*=3.49$). Esta se fue elevando en incrementos de 5 cm hasta el llenado completo, y el volumen real fue calculado progresivamente por el algoritmo. El sistema experimental se probó con la superficie de medición totalmente cubierta y el sistema comercial con la superficie descubierta.

2.5.3 Influencia de la superficie interceptada en la precisión de las mediciones (sólo para el sistema experimental)

Para el sistema experimental, se realizó una prueba de la influencia de la superficie a medir en la precisión de las medidas obtenidas, ya que se disponía de un array 2D de 12 sensores, para cada uno de los cuales el volumen captado por el cono varía a medida que se llena el sistema de almacenamiento. Para ello, el sensor se colocó frente a una pared lisa a una distancia de 240 cm, con 11 discos concéntricos de 6 cm de espesor y diferentes radios (10-60 cm) frente al sensor. Los discos encajaban unos dentro de otros, y sus centros se alinearon con los del sensor (Figura 31). Con todos los discos encajados, el diámetro del círculo formado coincide con la abertura del cono a la distancia dada. Las mediciones se realizaron aumentando el número de círculos (variación de la superficie captada) desde el centro hacia el exterior y en secuencia inversa, comprobando la exactitud de las medidas de distancia obtenidas.

2.5.4 Influencia del color y la reflectividad de la superficie medida en la precisión de la medición

Se colocaron diferentes objetivos en material de cartulina con diferente color (blanco, negro y verde) y con diferentes acabados superficiales (mate o brillante) a una altura fija de 100 cm por encima del sistema de almacenamiento (Tabla 6). A continuación, se tomaron mediciones a una distancia fija y conocida común a todos los objetivos para evaluar la influencia del color en

la exactitud de la medición en condiciones de iluminación similares (1166.67 ± 34.96 lx). La prueba se realizó con ambos sistemas.

Tabla 6. Coordenadas en el espacio de color CIELAB para los objetivos usados

Objetivo	L*	a*	b*
Negro brillante	27.21	2.10	-1.96
Negro mate	26.51	0.33	1.05
Blanco brillante	83.40	-0.44	-0.87
Blanco mate	93.02	0.63	-2.09
Verde brillante	57.45	-41.85	30.77
Verde mate	51.79	-37.68	16.04

2.5.5 Influencia de la iluminación ambiental en la exactitud de las mediciones.

Los dos sistemas se colocaron al aire libre, en dos días diferentes (un día por sistema), comenzando con condiciones nocturnas (0 lx) y terminando en condiciones diurnas en torno a 40 klx. Las mediciones se registraron a intervalos de 30 s, tomando como referencia las mediciones de ambos sistemas con el *big box* vacío, a fin de comprobar la influencia de la variación de los niveles de iluminación en las mismas. Para el sistema experimental se utilizaron dos luxómetros, uno situado en el exterior, orientado hacia arriba, sin encapsular, para comprobar la iluminación externa sin atenuaciones, y otro en la parte interna del centro del conjunto de sensores con el mismo encapsulado que los sensores para comprobar la iluminación recibida en estas condiciones.

2.5.6 Obtención de la estimación del error de peso e influencia de la zona de llenado.

El *big box* se llenó discontinuamente con lotes de 5.36 ± 0.53 kg de fruto utilizando cajas de pequeña capacidad. Este paso se realizó del mismo modo para los sistemas comercial y experimental. Para cada medición, el peso acumulado se determinó mediante medición directa con el sistema basado en células de carga, así como mediante estimación del peso utilizando los algoritmos desarrollados. En cada uno de los dos sistemas de medición, se probaron tres configuraciones de llenado del *big box*: desde el centro (CE), desde la esquina (CO) y desde el lateral (SI), con dos repeticiones cada una. Estas tres configuraciones de llenado se utilizaron principalmente para probar el sistema experimental. Los sensores próximos a las paredes del *big box* se instalaron de forma que su cono no interfiriera con las paredes para no dar mediciones erróneas. En el caso de la cámara 3D, este problema se evita limitando el FoV y seleccionando píxeles específicos. Esta prueba de estimación de errores se realizó con aceitunas de la variedad "Manzanilla de Sevilla" recolectadas en noviembre durante la temporada de recolección. Para la prueba fue necesario determinar la densidad de los lotes de aceitunas, para lo cual se pesó el volumen de agua desplazado por 10 muestras de 5 kg de fruto, determinándose una densidad de 655 kg/m^3 .

2.5.7 Rendimiento del sistema con aceleraciones cambiantes

El monitor de rendimiento con toda la instrumentación necesaria se instaló en un tractor de orugas (TK4, New Holland, EE.UU.) para evaluar la influencia de la vibración y el movimiento de la carga en la estimación del peso durante el tránsito fuera de la carretera, en una parcela. Para ello, se llenó el *big box* con una carga de 243 kg de aceitunas, medidos por la báscula utilizada en

condiciones estáticas. Posteriormente el tractor transitó por un terreno irregular durante ~ 300 m a una velocidad adecuada para un tractor durante las operaciones de campo ($2.70 \pm 1.46 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$). El peso se midió directamente con las células de carga y se estimó tanto con el sistema comercial como con el experimental en los mismos intervalos de tiempo y en condiciones de iluminación similares, con alta intensidad lumínica ($31603.39 \pm 12554.95 \text{ lx}$). También se registraron otros parámetros (fecha y hora, aceleraciones, posicionamiento GNSS e intensidad de la iluminación exterior e interior). Por último, se obtuvo un mapa con la variación del error de peso relativo de cada sistema utilizando el software ArcGIS Pro y la técnica de interpolación IDW (Inverse Distance Weighting).

3. Resultados

3.1 Obtención del campo de visión de ambos sistemas

El cono medido para los sensores del sistema experimental fue, individualmente, de 15° en el eje x y de $14,4^\circ$ en el eje y , siendo muy simétrico a ambos lados de los ejes y muy próximo a los 15° indicados en la ficha técnica del fabricante. Para el sistema comercial, el cono obtenido fue de 64.77° en el eje x y de 19.98° en el eje y , ligeramente inferior al especificado por el fabricante (70° en el eje x y 23° en el eje y) (Figura 27). Todos los puntos trazados para el cálculo del cono son el resultado de la media de dos mediciones.

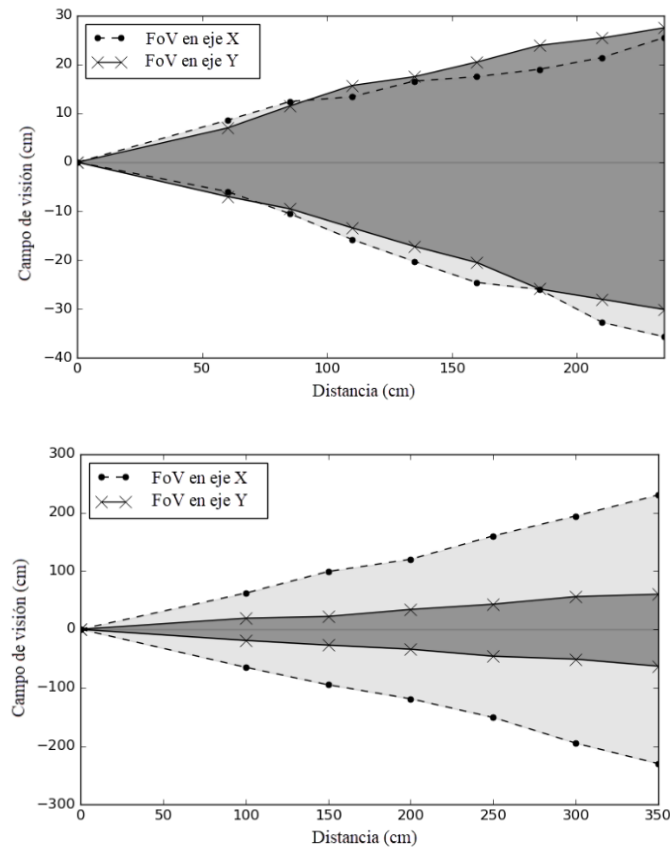


Figura 27. Campo de visión del sistema experimental (izquierda) y del sistema comercial (derecha). El origen de las coordenadas XY corresponde a la posición del sensor para cada sistema

3.2 Obtención de la exactitud y repetibilidad de ambos sistemas (distancia y volumen)

Para el sistema comercial, los resultados obtenidos en las mediciones sobre la pared mostraron una distribución heterogénea del error relativo a lo largo del campo de visión y a diferentes distancias, siendo menos uniforme cuanto más cerca de la pared se colocaba la cámara 3D (Figura 28). El error relativo medio osciló entre $2.35 \pm 2.02 \%$ a 175 cm y $4.52 \pm 1.99 \%$ a 350 cm, con una elevada repetibilidad. Cabe señalar que el mayor error se observó en los píxeles de las esquinas y los extremos del FoV del sensor, aunque éstos no se utilizaron en este trabajo debido a la geometría del *big box*. Así, en el FoV de la cámara 3D, el *big box* ocupa desde el píxel con las coordenadas (19,1) hasta el píxel (41,14), quedando el resto de las medidas sin utilizar. Sin embargo, el elevado error relativo obtenido hizo necesario implementar una regresión por píxel para mejorar la exactitud. Tras la aplicación de las correcciones, los resultados mejoraron considerablemente, obteniéndose un error relativo medio de distancia a la superficie de la pared de $1.18 \pm 1.31 \%$ y $0.95 \pm 1.48 \%$, en los intervalos de 175 y 350 cm respectivamente (Figura 29, derecha). En el intervalo de trabajo del caso práctico con la altura de llenado del *big box*, se obtuvo un error relativo medio del $0.51 \pm 0.34 \%$ para una altura de 240 cm y de $0.75 \pm 0.84 \%$, para la altura de 300 cm. El error absoluto medio en el intervalo de trabajo fue de 1.52 ± 1.66 cm.

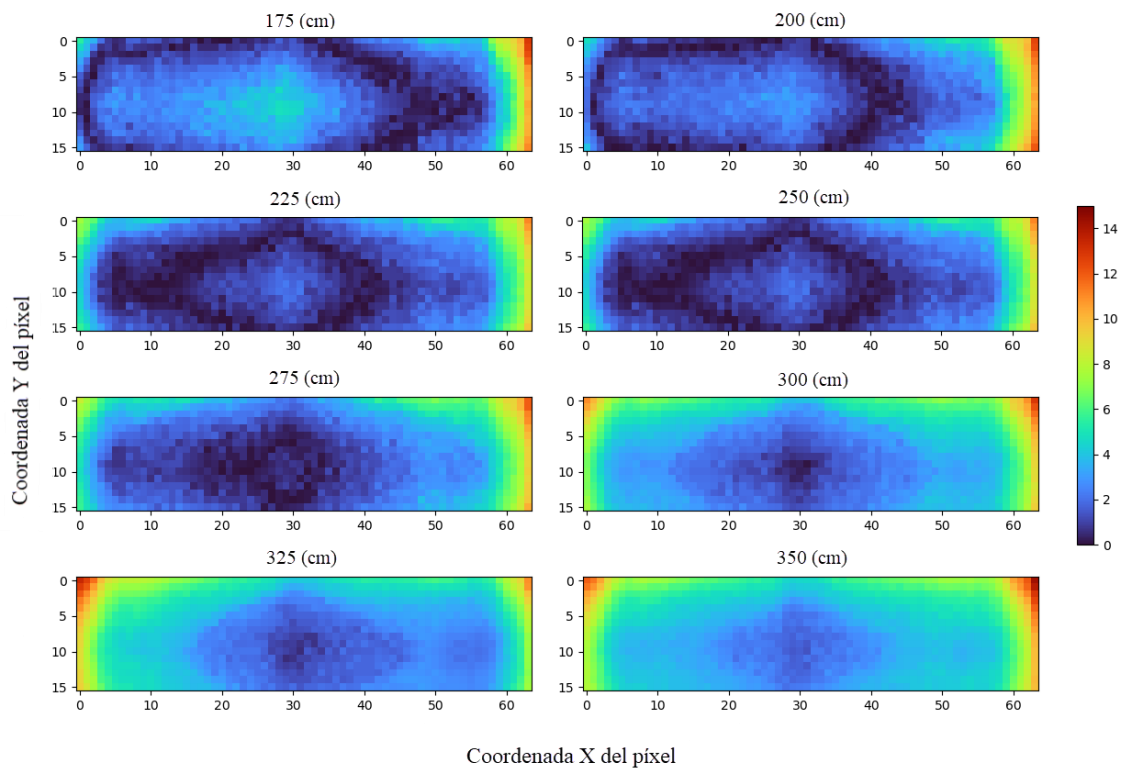


Figura 28. Error relativo (%) en la distancia para el sistema comercial en diferentes posiciones desde una pared antes de las correcciones de la cámara 3D. Cada píxel corresponde a una medición en el FoV de la cámara 3D (1024 píxeles)

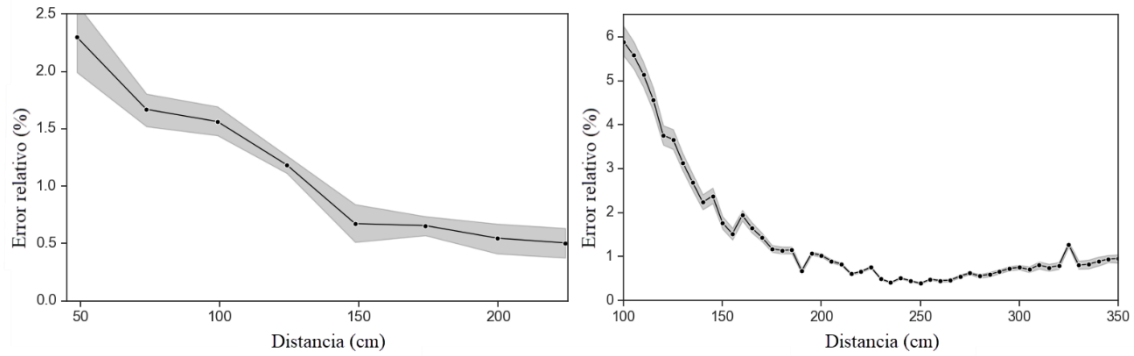


Figura 29. Error relativo en la distancia a diferentes posiciones de una pared para el sistema experimental (izquierda) y para el sistema comercial con correcciones (derecha). La banda gris delimita los límites de incertidumbre debidos a las 10 medidas

En el sistema experimental, el error relativo medio en la distancia fue siempre inferior al 2.5 %, que disminuía a medida que aumentaba la distancia al objetivo hasta obtener un error mínimo del 0.5 % a 225 cm (Figura 29, izquierda). Dentro del rango de trabajo del caso de estudio en la medición del *big box* (100-170 cm), el error relativo medio se situó entre el 0.66 y el 1.56 %. Para el cálculo del error relativo medio, se utilizó la media de 10 mediciones realizadas en el rango de trabajo, y así se obtuvieron 97.65 ± 0.22 cm y 172.66 ± 0.25 cm para los extremos inferior y superior de este rango. El error absoluto medio en el rango de trabajo fue de 12.83 ± 2.22 cm.

En el cálculo del volumen, con el *big box* y el procedimiento descrito anteriormente, el error relativo medio obtenido fue de 1.65 ± 0.86 % y 5.40 ± 3.97 % para el sistema experimental y el sistema comercial, respectivamente (Figura 30).

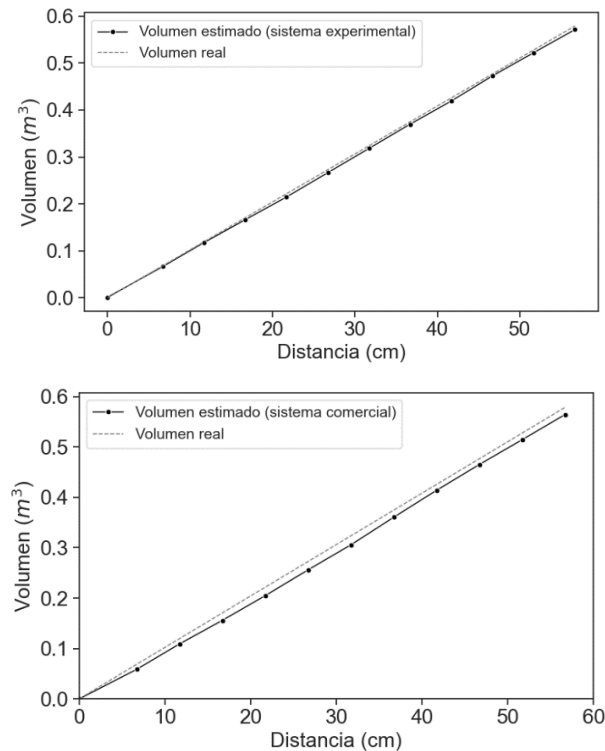


Figura 30. Volumen real frente a volumen estimado en el big box para el sistema experimental (izquierda) y el sistema comercial (derecha). Cada punto corresponde a la medición de volumen realizada con cada aumento de altura de la superficie utilizada.

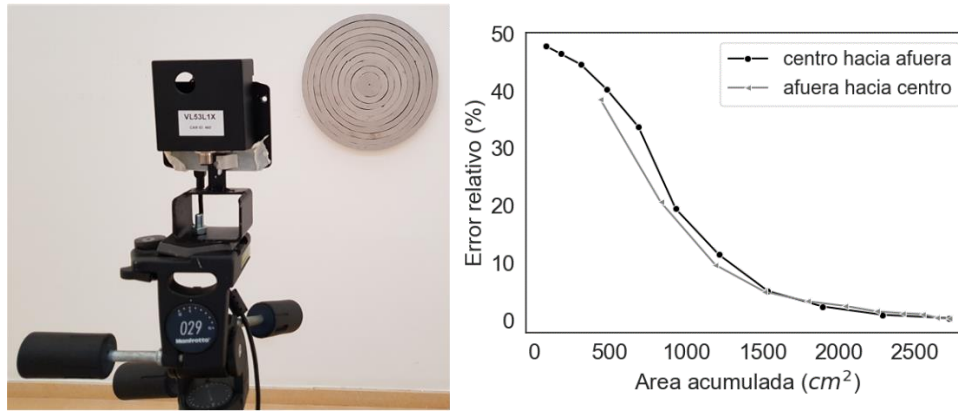


Figura 31. Error relativo en la distancia (derecha) con diferentes superficies de área interceptadas por el FoV de un sensor ToF (izquierda). El área acumulada corresponde a la adición de los distintos círculos

3.3 Influencia de la superficie interceptada en la exactitud de las mediciones (sólo sistema experimental)

En el caso del sistema experimental, se observó que un aumento progresivo de la superficie a medir provocaba también un aumento de la exactitud de las mediciones. En la Figura 31 se muestra cómo varía la exactitud del sensor a medida que aumenta la superficie (círculos de menor a mayor tamaño progresivamente hacia el exterior y viceversa). Inicialmente, se observó un error relativo muy elevado, en torno al 50 %, desde el centro hacia el exterior, debido a un valor muy bajo del área del círculo (78.5 cm^2) en comparación con la dirección exterior-interior, cuyo círculo tiene un área mayor (434.3 cm^2) y dio un error relativo inferior al 40 %. También se observó que, en algunos puntos, se obtenían errores relativos diferentes a áreas acumuladas iguales, lo que sugiere que la posición de los círculos con respecto al cono influye en la precisión obtenida. Se observó que, a medida que las áreas acumuladas se igualaban, los errores también se aproximaban (0.37 % y 0.24 %, respectivamente) cuando el círculo estaba completo en las dos secuencias probadas.

3.4 Influencia del color y la reflectividad de la superficie medida en la exactitud de la medición

Los resultados obtenidos muestran que el error relativo medio obtenido con los objetivos cuyo acabado superficial era brillante fue siempre superior, en torno al $7.84 \pm 6.02 \%$ para el sistema comercial y al $3.29 \pm 0.08 \%$ para el sistema experimental, y, en el caso del blanco mate, $4.03 \pm 2.20 \%$ y $1.44 \pm 0.21 \%$, respectivamente. Por colores, se observó que el error relativo máximo se produjo con el objetivo negro brillante y el sistema comercial ($8.29 \pm 2.73 \%$) y el error relativo medio mínimo con el objetivo verde mate para el sistema experimental (1.25 %) (Figura 32).

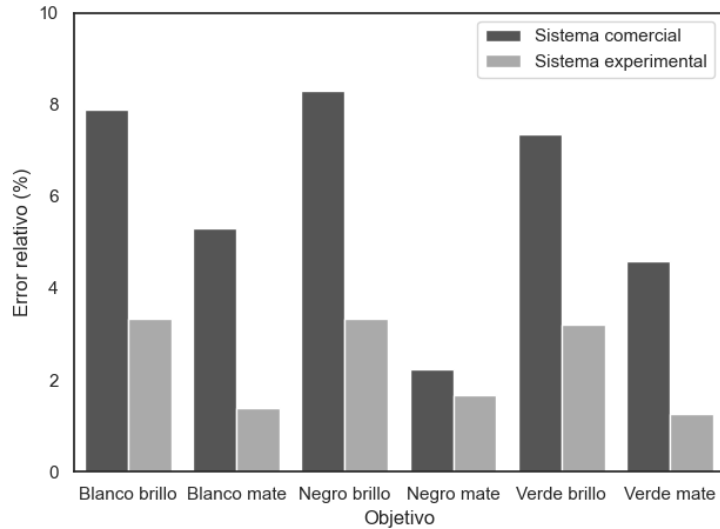


Figura 32. Errores relativos en la distancia medida utilizando los sistemas experimental y comercial para objetivos de diferentes colores y acabado superficial

3.5 Influencia de la iluminación ambiental en la exactitud de las mediciones

La Figura 33 muestra la variación del error absoluto con distintos niveles de iluminación para ambos sistemas de medida. En el sistema experimental, observamos un aumento progresivo del error absoluto medio a medida que aumenta la iluminación ambiental, alcanzando casi 0.3 m^3 con una iluminación de aproximadamente 130 lx . En el sistema comercial, la variación absoluta del volumen se registró directamente debido a la gran cantidad de información que requeriría registrar las medidas de cada píxel a lo largo del tiempo. En este caso, observamos una mayor dispersión de las mediciones a partir de 3000 lx y, sobre todo, a partir de aproximadamente 10000 lx .

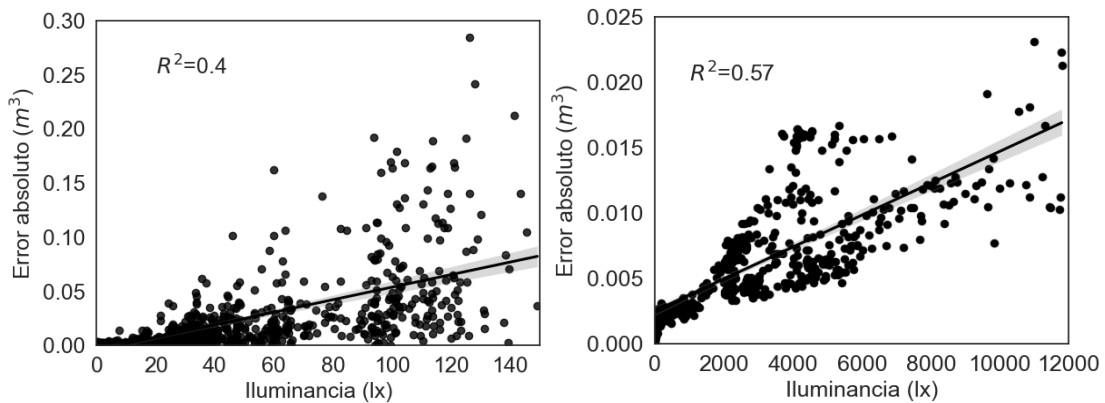


Figura 33. Error absoluto en volumen con diferentes niveles de iluminación para el sistema experimental (izquierda) y el sistema comercial (derecha). La línea negra indica la correlación lineal.

3.6 Error de estimación del peso obtenido e influencia de la zona de llenado

En la Figura 34 puede observarse el error absoluto de los sistemas experimental y comercial en las tres configuraciones de llenado del sistema de almacenamiento. Para el sistema experimental con 156 kg de peso real, se obtuvo un error absoluto medio de $28.26 \pm 10.48 \text{ kg}$ al llenar de fruto por el centro frente a $19.15 \pm 4.26 \text{ kg}$ y $5.42 \pm 3.44 \text{ kg}$ al llenar por la esquina y el lateral, respectivamente. Dentro de cada prueba de llenado, se observó una alta repetibilidad en

la estimación del peso para las tres configuraciones. En el sistema experimental, las mediciones desde el centro sobreestiman el peso, mientras que las de la esquina lo subestiman, y las mediciones de llenado desde el lateral se ajustan más al peso instantáneo real. Sin embargo, en el sistema comercial todas las configuraciones de llenado son muy similares y subestiman ligeramente el peso instantáneo real. En el sistema comercial, con 156 kg de peso real, las tres configuraciones presentan un error absoluto medio inferior al del sistema experimental. Se obtuvieron errores absolutos medios de 13.45 ± 5.34 kg, 11.07 ± 5.60 kg y 11.86 ± 5.40 kg para las configuraciones central (CE), de esquina (CO) y lateral (SI), respectivamente.

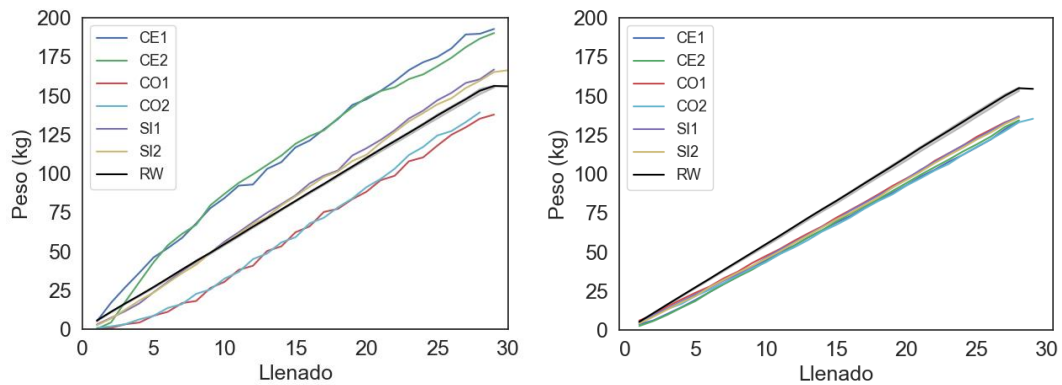


Figura 34. Peso estimado para dos repeticiones (1,2) por llenado central (CE), de esquina (CO) o lateral (SI) para el sistema experimental (izquierda) y el sistema comercial (derecha). La línea negra indica el peso real (RW). La banda gris alrededor de la línea de peso real delimita los límites de incertidumbre debidos a las diferentes repeticiones

3.7 Obtención del error de peso estimado con cambios de aceleración durante el tránsito por un recorrido irregular

En la prueba dinámica realizada durante las aceleraciones, el RMS (Root Mean Square) registrado en el monitor de rendimiento varió considerablemente con el tiempo y a lo largo del trayecto (Figura 35).

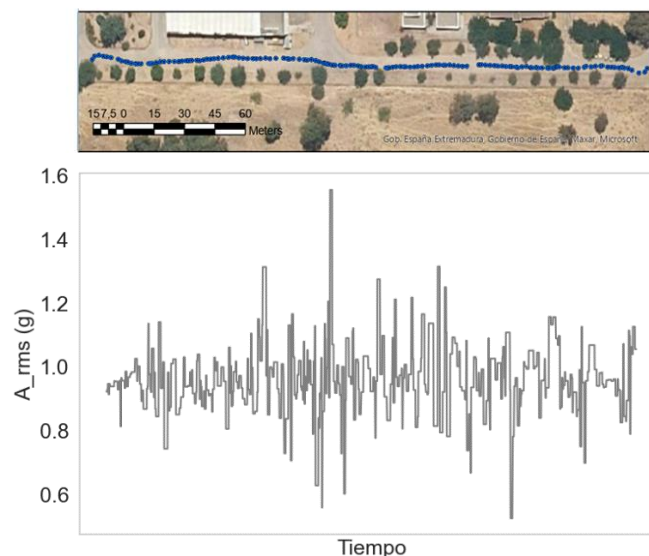


Figura 35. Ruta GPS registrada por un tractor con los sistemas durante el tránsito por el recorrido irregular (arriba) y aceleración RMS medida durante la prueba (abajo)

En cuanto al peso estimado, tanto para el sistema experimental como el sistema comercial, también se observaron oscilaciones continuas en los datos registrados por las células de carga en

torno a la línea de peso real (Figura 36). En general, las mediciones del peso estimado y el error relativo del sistema experimental presentaron oscilaciones (215.55 ± 6.90 kg, 11.3 ± 2.83 %), pero se mantuvieron más estables que las células de carga (242.86 ± 29.15 kg, 6.26 ± 10.23 %), con las que se midió un mínimo de - 28 kg y un máximo de 511 kg. El peso estimado estuvo por debajo de la línea de peso real (243 kg), lo que suponía una subestimación del peso de la carga transportada. Por el contrario, el sistema comercial también mostró algunas oscilaciones (278.78 ± 6.76 kg, 16.72 ± 3.16 %) aunque, de nuevo, fue más estable que las células de carga (236.79 ± 17.68 kg, 5.5 ± 6.81 %), con un mínimo de 95.5 kg y un máximo de 364 kg. En este caso, el peso estimado por el sistema comercial estuvo siempre por encima de la línea de peso real, sobrestimando la carga. La Figura 37 muestra un mapa de colores del error relativo a lo largo del trayecto recorrido. Ambas tecnologías de medición de distancia generan un mapa de error mucho más homogéneo que el obtenido con la tecnología de pesaje convencional, que fue mucho más variable.

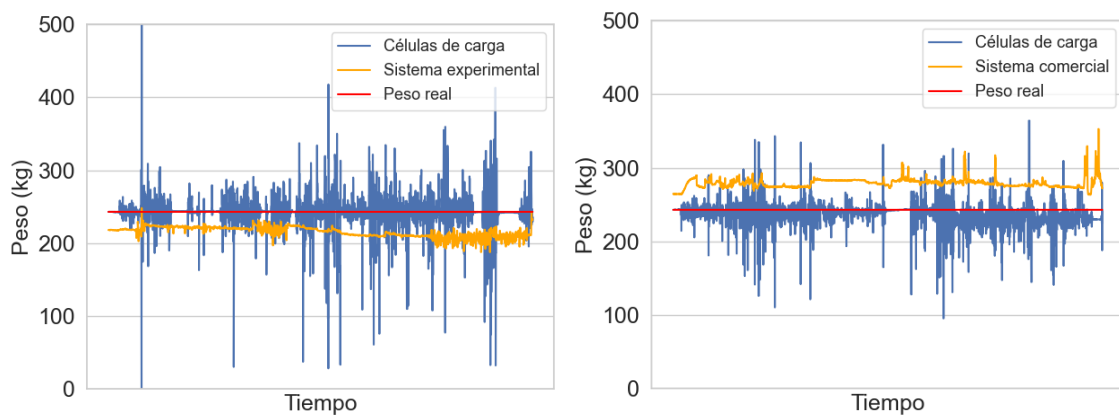


Figura 36. Peso estimado (línea naranja) para el sistema experimental (izquierda) y el sistema comercial (derecha). La línea roja y la línea azul indican el peso real transportado y el peso medido por las células de carga, respectivamente



Figura 37. Variación del error relativo del peso teniendo en cuenta la carga transportada durante la prueba dinámica para diferentes sistemas

4. Discusión

El experimento de medición del campo de visión proporcionó resultados muy próximos a los indicados en las fichas técnicas de ambos sistemas. Las desviaciones o errores producidos pueden ser sistemáticos debidos a factores internos de los propios sensores, o no sistemáticos

debidos a factores externos como el entorno y/o a las diferentes condiciones de ensayo como la iluminación ambiental, la naturaleza del objetivo, etc. (Hansard et al., 2013). La disposición de array 2D en configuración 3x4 utilizada para el sistema experimental y las dimensiones del *big box* implican el solapamiento de los FoV de los sensores debido a su posición y campo de visión. Sin embargo, esta disposición se seleccionó para ajustarse a la geometría rectangular del sistema de almacenamiento, y la distribución espacial de los sensores era necesaria para evitar introducir errores de medición debidos a las paredes del *big box*. El solapamiento de los FoV de los distintos sensores no influye en sus mediciones individuales, y la introducción de un número mayor mejoraría las estimaciones obtenidas, reduciendo los puntos auxiliares necesarios calculados. Para el sistema comercial, la desigualdad entre los FoV en los ejes x e y obligó a elevar la altura de instalación del sensor respecto al sistema experimental, para adaptarlo a la anchura del *big box*. Esto también implica desprestigiar gran parte de los píxeles disponibles de la cámara 3D, ya que inciden fuera del sistema de almacenamiento. Un sistema comercial con un FoV más adaptado a la geometría del *big box* permitiría desprestigiar menos píxeles, mejorando la exactitud en la estimación del peso. Para ambos sistemas de medición, fue esencial fijar la posición del sistema de almacenamiento durante el funcionamiento en dinámico, ya que el desplazamiento o la rotación implicarían la necesidad de recalibrar ambos sistemas debido al cambio en la posición relativa del *big box* dentro del FoV.

La prueba de exactitud de ambos sistemas se realizó teniendo en cuenta dos criterios. Por un lado, una evaluación de la exactitud del sensor en la medición de la distancia y, por otro, la exactitud del algoritmo de cálculo del volumen ocupado en el sistema de almacenamiento. Para el sistema experimental, se obtuvo un error relativo medio bajo para la medición de la distancia dentro del rango de trabajo, que además siguió una línea descendente, disminuyendo el error a medida que aumentaba la distancia a la pared. Para el sistema comercial, se midieron errores relativos elevados con un aumento progresivo desde el centro del FoV del sensor hacia los extremos, obteniéndose errores máximos generalmente en las esquinas (Jung et al., 2015). Estos errores se redujeron mediante las regresiones aplicadas por píxel y se observó, al igual que en el sistema experimental, cómo el error relativo medio disminuía a medida que aumentaba la distancia a la pared hasta un valor mínimo, a partir del cual volvía a aumentar (Lindner et al., 2010). Sin embargo, el rango de distancia de medición fue el de menor error relativo, y prácticamente coincidió con el rango de distancia óptimo para el cálculo del volumen cuando el *big box* estaba lleno y vacío, justificando así también la altura de instalación del sistema comercial.

El algoritmo de cálculo del volumen para los sistemas experimental y comercial se comportó de forma similar a la evolución real del volumen para el llenado del sistema de almacenamiento utilizando una superficie plana. En este caso, el sistema comercial tuvo una exactitud menor debido a dos factores. Por un lado, el mayor número de mediciones implicadas en el cálculo del volumen (350 frente a 12) y, por otro, la variabilidad en las mediciones de píxeles desde el centro del FoV hacia los extremos. Además, como la superficie usada era plana y la exactitud en la distancia fue mayor para el sistema experimental, los puntos auxiliares estimados para este sistema están situados en la línea recta que une los puntos de medición reales, lo que contribuye a la estabilidad del error y, por tanto, a una mejor aproximación al valor real. Existen otros factores inherentes a la tecnología empleada como la temperatura, el tiempo de integración o la frecuencia de modulación de la onda infrarroja que pueden afectar a la precisión (Fursattel et al., 2016), aunque en este trabajo no se consideraron.

El factor del nivel de iluminación afectó de forma diferente a los dos sistemas. El sistema experimental dispone de un modo de configuración denominado "Corto" que aumenta la

inmunidad a la luz ambiente, aunque fue necesario configurarlo en modo "Medio" para obtener un rango de medición acorde con la altura de la instalación. Además, fue necesario cubrir el área de medición debido a la inestabilidad observada en las mediciones. La incidencia de la luz directa hace que este sistema sea totalmente inviable si está descubierto. Por el contrario, el sistema comercial fue prácticamente insensible a la luz y pudo funcionar en condiciones reales de iluminación sin ninguna medida de atenuación. Ambos sistemas operan a diferentes longitudes de onda y modos de operación, 840 nm en luz modulada para el sistema comercial y 940 nm en luz pulsada para el experimental, lo que puede influir en su rendimiento bajo diferentes condiciones de iluminación (Illade-Quinteiro et al., 2015). Otros factores como la frecuencia de modulación del pulso (Jongenelen et al., 2011) y la aplicación de filtros para la eliminación de la luz externa (Tobias et al., 2005) también afectan a la exactitud de sistemas ópticos similares. La necesidad de cubrir la zona de medición, protegiéndola de la luz, hace que el sistema experimental sea más adecuado para máquinas con tolvas de acumulación de fruto cubiertas y sistema de llenado lateral o en esquina, para no interferir con los pulsos de luz emitidos por los sensores. El sistema comercial presenta más versatilidad para su aplicación práctica e incluso puede ajustarse para la medición del flujo de fruto en una cinta transportadora combinado con un sensor de velocidad de la cinta transportadora, como se hace en otros sectores como la viticultura (Taylor et al., 2016).

Los ensayos de influencia del color y el acabado de la superficie en la medición revelan que son factores importantes a tener en cuenta en la estimación del peso mediante sistemas ópticos (Dashpute et al., 2019; Lakovic et al., 2019). Las superficies con acabado brillante dan un mayor error en ambos sistemas en comparación con las superficies con acabado mate debido al cambio en la reflectividad. Para el sistema comercial el error relativo medio con cualquier color y acabado superficial fue siempre mayor que para el experimental, justificado en parte por el mayor número de medidas registradas y su variabilidad desde el centro a los extremos del FoV. En la aplicación práctica de ambos sistemas es necesario estudiar las características del fruto a recolectar, en cuanto a color y reflectividad, y las condiciones externas que pueden alterar las características intrínsecas del fruto, como la lluvia o el polvo.

La estimación estática del peso utilizando diferentes zonas de llenado arrojó resultados diferentes en función del sistema evaluado. Para el sistema experimental, el llenado desde el lateral del *big box* fue el más exacto, mientras que el llenado desde el centro o la esquina sobreestimó y subestimó el peso, respectivamente. Los elevados errores relativos al inicio del llenado desde cualquier parte del sistema de almacenamiento se deben a la influencia de la superficie medida en relación con la anchura de apertura del cono sensor, como se observa en la prueba realizada para estudiar este factor (Figura 7). Esto explica también por qué el llenado central fue el de menor exactitud. La aplicación práctica de una u otra ubicación dependerá de cuál se adapte mejor a las características del sistema de almacenamiento y a la entrada de fruto en el mismo. También supondría la aplicación de un determinado valor de offset en función del lugar de llenado para ajustar con mayor exactitud el peso estimado al peso real. En cambio, para el sistema comercial, el lugar de llenado fue prácticamente indiferente, igualándose los errores cometidos por los distintos lugares de llenado cuando el sistema de almacenamiento alcanzaba alrededor del 20 % de su capacidad. Al iniciarse el llenado, la exactitud de este sistema fue superior a la del sistema experimental debido a la utilización de numerosas mediciones de píxeles en lugar de un número reducido de sensores, con el problema asociado de la superficie con respecto a la apertura del cono. Sin embargo, a medida que avanzaba el llenado, el peso estimado divergió cada vez más del peso real para cualquier lugar de llenado, por lo que sería aconsejable probar este sistema con otras geometrías de almacenamiento o volúmenes mayores.

Durante la prueba dinámica, las oscilaciones observadas en el sistema comercial se debieron a la plena exposición a la luz solar y siguieron una evolución similar a las oscilaciones del nivel de iluminación medido. En el sistema experimental, a pesar de estar cubierto, se detectaron niveles muy bajos de iluminación que, sin embargo, fueron suficientes para afectar a las mediciones realizadas. También hay que señalar que en esta prueba se produjeron diferencias de error relativo medio mayores (11.3 % para el sistema experimental y 14.7 % para el sistema comercial) que las detectadas en la prueba de llenado estático, ya que el fruto se distribuyó de forma más homogénea en el *big box* debido a las oscilaciones durante el movimiento y a la variabilidad de la iluminación. Las partes de la señal de peso estimada con mayor variabilidad coinciden con las del sistema comercial. Sin embargo, ambos sistemas funcionaron mejor que las células de carga, que son muy sensibles a las aceleraciones (Maja and Ehsani, 2010) y deben corregirse mediante amortiguadores mecánicos o filtrado de la señal.

Las pruebas estáticas y dinámicas realizadas con ambos sistemas confirman la necesidad de aplicar un offset para ajustar el peso estimado al real. Este valor de offset se estimó en aproximadamente +28 kg para su aplicación al sistema experimental y -23 kg para el comercial. Por otro lado, se pueden llevar a cabo acciones de calibración de la distancia (Fuchs and Hirzinger, 2008), corrección por diversos métodos (He et al., 2017) y mejora de la exactitud (Jongenelen et al., 2010). Es cierto que realizar la medición de forma indirecta conlleva una pérdida de exactitud en el cálculo del peso, pero los problemas derivados de las aceleraciones pueden reducirse o eliminarse sin necesidad de un complejo proceso de filtrado de la señal. Además, pueden evitarse los problemas mecánicos y de diseño que surgen en las instalaciones de células de carga en sistemas dinámicos. Por otro lado, la exactitud del sistema experimental puede mejorar mediante el cálculo de más puntos auxiliares ya que, cuanto mayor sea el número de puntos estimados, más se acercará la curva obtenida a la realidad. Para su aplicación práctica, la exactitud de los sistemas evaluados podría mejorarse aplicando una corrección del valor de la densidad del fruto, en lugar de utilizar un valor fijo, ya que a medida que avanza la temporada de cosecha este valor varía debido al aumento del tamaño del fruto durante la maduración (Nasini and Proietti, 2014). Para ello, se puede realizar una medición progresiva de la densidad del fruto y actualizar el valor en el algoritmo de forma que se ajuste automáticamente.

Finalmente, comparando el coste de ambos sistemas, encontramos que el sistema experimental presenta un coste aproximadamente cinco veces inferior al sistema comercial. El coste del sistema de células de carga sería un coste intermedio entre las dos alternativas desarrolladas. Evidentemente, una vez alcanzada la fase de producción comercial, sería necesario modificar los costes reales para incluir los costes de desarrollo, la inserción de otros componentes, además del beneficio industrial. Los trabajos futuros deberían orientarse hacia la aplicación de estos sistemas en cosechadoras reales. Las dimensiones de las máquinas pueden limitar la colocación de los sensores ToF, especialmente el sistema comercial, debido al campo de visión de ambos. Las condiciones ambientales también podrían causar graves errores en los sistemas ToF, especialmente en el sistema experimental, si no se pudieran cubrir completamente. Las variaciones en la velocidad de la máquina, así como las variaciones en la orografía, pueden provocar graves desviaciones de los resultados en las células de carga si no se realiza un filtrado adecuado, pero incluso podrían verse dañadas por impactos generados por una carga elevada. El tipo de sistema de almacenamiento de la cosechadora y su forma de llenado requerirían un ajuste previo de las estimaciones de volumen calculadas. Además, las distintas variedades de fruto recolectado deberían ser previamente tabuladas en términos de densidad para poder ajustar la estimación de peso por volumen. Estas y otras cuestiones técnicas deberían ser estudiadas en

casos concretos de máquinas mediante un trabajo exhaustivo en campo para determinar la viabilidad técnica y económica final de cada sistema y su optimización.

Capítulo 5

Conexiones máquina a máquina para la gestión integral de la producción de aceitunas

1. Introducción

La trazabilidad de la producción de alimentos es actualmente una necesidad por razones de seguridad, calidad y aporte de valor añadido al producto. En el olivar, la recogida de información se produce en la industria cuando el agricultor entrega los lotes de fruto junto a la información que ha recabado en su cuaderno de campo donde se indica a grandes rasgos el origen y procedencia, así como algunas prácticas llevadas a cabo durante su producción. Esta información está normalmente manuscrita, por lo que no supone un registro fiable y eficiente de la trazabilidad del fruto. Algunas aplicaciones del mercado permiten digitalizar dicha información, aunque requieren de inserción manual de la información y, además, no se contemplan todas las actividades realizadas durante el ciclo de producción de forma fehaciente. En industria, la gestión de la información interna está más conseguida, pero se carece de un protocolo adecuado para el intercambio de información con el campo y de dispositivos para tal fin.

En este trabajo se propone una metodología para la adquisición automatizada de datos relativos a lotes de fruto a lo largo de toda la fase de campo y la interconexión de estos con la fase industrial (Figura 38). Para ello, se ha desarrollado un dispositivo electrónico, iOlivetrack-D, para ser embarcado en las máquinas, utilizándose la tecnología RFID para identificar las parcelas donde se realizan todas las operaciones de campo y asociar los inputs generados en ellas, así como la transferencia de datos a la industria. Como alternativa se emplea un sistema GPS para la identificación de parcelas en tiempo real. Por otro lado, se ha desarrollado una aplicación *web* basada en tecnología *cloud computing*, iOlivetrack-W, que permite registrar y clasificar automáticamente toda la información generada en la fase de campo e industria y, posteriormente, consultar los datos procesados, disponiendo de diferentes roles de usuarios (agricultor - productor - consumidor). Se utiliza un código QR como elemento de conexión para que los consumidores del producto obtengan información sobre el histórico de producción.



Figura 38. Metodología y sistemas desarrollados para la gestión integral de la trazabilidad desde el campo hasta la industria

2. Materiales y métodos

2.1 Dispositivo electrónico 'iOlivetrack-D'

iOlivetrack-D es un dispositivo flexible que permite la identificación de las parcelas de una explotación, la adquisición y carga de datos en una aplicación web (iOlivetrack-W) y el etiquetado de los lotes de productos. Este dispositivo se monta normalmente en el tractor que

controla la maquinaria utilizada durante las distintas operaciones de campo. Un dispositivo similar podría instalarse en la industria para registrar en el servidor las operaciones de la industria. Los componentes del dispositivo se muestran en la Figura 39 y se describen a continuación.

- A. Pantalla HMI (CR1200, IFM, Essen, Alemania). Pantalla de 12" con teclas de función y varias interfaces de comunicación como un bus CAN, USB y Ethernet. Capacidad de almacenamiento de 1 GB para el registro de datos y un reloj en tiempo real (RTC).
- B. Lector/grabador RFID UHF (ISC.LRU1002, FEIG Electronic, Hessen, Alemania). Este dispositivo tiene una potencia de salida configurable de hasta 2 W y permite la multiplexación de hasta 4 antenas. Además, dispone de interfaces de comunicación USB, Ethernet y RS232 y grado de protección IP64.
- C. Antena RFID. Permite un alcance ajustable de 8 metros y un cono de emisión de 65° en los ejes x e y en combinación con el lector/grabador. Tamaño 270 × 270 mm.
- D. Etiquetas RFID UHF (Higgs 3, Alien Technology, California, EE.UU.). Etiqueta pasiva de PVC con una memoria de 512 bits. Las etiquetas pueden funcionar sobre elementos metálicos.
- E. Módem 3G (MTX-3G-JAVA-GPS, Matrix, Barcelona, España). El módem proporciona comunicación RS232. La comunicación entre la pantalla HMI y el módem se establece a través de un convertidor CAN-RS232. Se ha programado un búfer interno para registrar información en la memoria siempre que no haya cobertura móvil y para reenviar la información cuando se reanuda la cobertura. El receptor GPS tiene una precisión de 2,5 m y es compatible con el protocolo NMEA.
- F. Sensores desplegados para medir las variables a bordo de la maquinaria utilizada en las operaciones de campo. Ejemplo de configuración con un codificador y un sensor inductivo.
- G. Fuente de alimentación. iOlivetrack-D necesita un rango de alimentación de 9-32 VDC. Puede conectarse a la batería de un tractor de 12 VCC, ya que un tractor es una máquina utilizada habitualmente para las operaciones de campo.
- H. Caja de conexiones para interconectar todos los elementos de iOlivetrack-D.

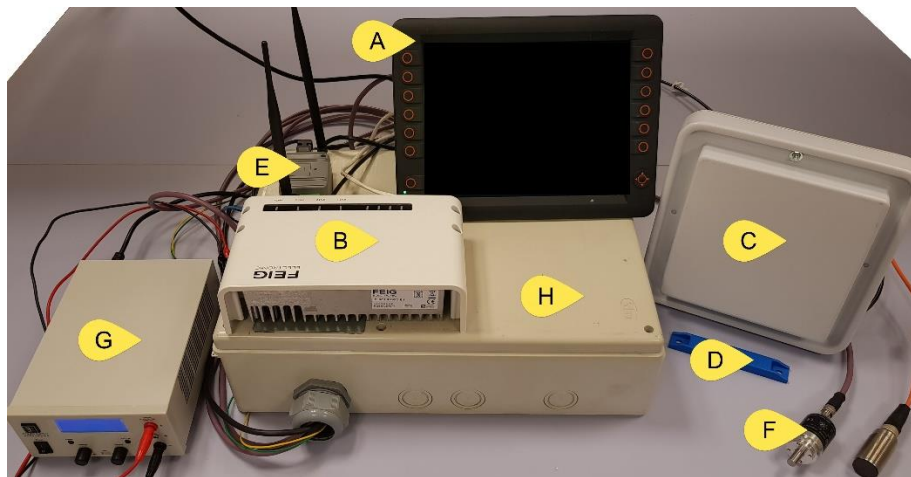


Figura 39. Dispositivo electrónico iOlivetrack-D y sus componentes.

Aunque esta aplicación utiliza un módem que incorpora GPS, el sistema iOlivetrack-D podría prescindir del GPS y realizar la identificación de sectores utilizando únicamente RFID. Sin embargo, como se verá más adelante, ambas tecnologías (RFID y GPS) tienen sus pros y sus contras y el uso conjunto de ambas puede aumentar la fiabilidad del sistema y darle la flexibilidad necesaria para adaptarse a distintas necesidades.

2.2 Aplicación web "iOlivetrack-W

La aplicación web funciona sobre una base de datos implementada en MariaDB que es un sistema de gestión de base de datos con Licencia Pública General (GPL) con alta compatibilidad con bases de datos MySQL. Los servicios web implementados para transferir información entre el servidor y la base de datos han sido programados en ASP.NET, un entorno para aplicaciones web de Microsoft. La aplicación web desarrollada, iOlivetrack-W, permite crear un sistema de identificación para el registro de parcelas y sectores, operaciones, sensores, parámetros y productos como información adicional asociada. Su función principal es recibir la información a nivel de parcela y sector desde el iOlivetrack-D, alojarla en la base de datos y mostrarla al usuario cuando la solicite. La Figura 40 muestra la estructura de la interfaz de usuario de la aplicación web con cinco secciones diferenciadas: Campo (A), Industria (B), Administrador (C), Filtros de consulta (D) y Resultados (E) donde Campo e Industria tienen un menú de edición (A1, B1) y otro de selección (A2, B2).

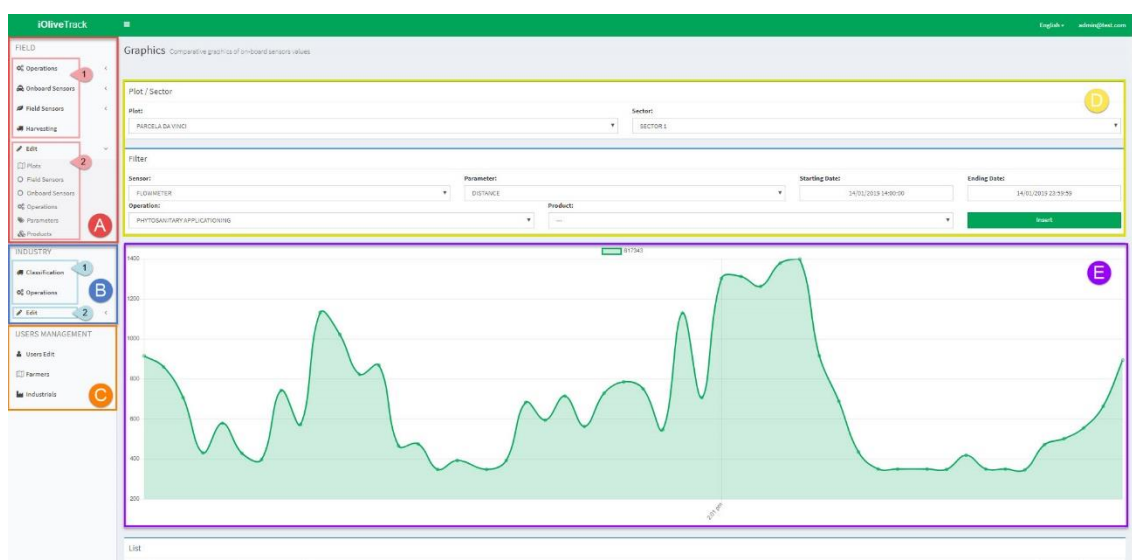


Figura 40. Interfaz de la aplicación web iOlivetrack-W en modo de usuario administrador. A: Área de campo, B: Área de industria, C: Área de gestión de usuarios, D: Opciones de filtros, E: Representación de datos, 1: Opciones de consulta, 2: Opciones de edición.

En la sección Campo (Figura 40. Sección A), el agricultor puede crear la parcela o sector que va a gestionar según criterios de tamaño, orografía, variedades, disposición, adaptación a determinada maquinaria y/o logística de recolección. Una parcela es el terreno declarado por el agricultor o identificado geográficamente según un código SIGPAC. Un sector es una superficie virtual e independiente que el agricultor delimita dentro de la parcela para asociarla a la gestión de la trazabilidad. Tanto a la parcela como al sector se les asigna automáticamente un ID por la aplicación web (plot_ID y sector_ID) y se vinculan a su correspondiente código SIGPAC si el agricultor lo ha insertado. La combinación del plot_ID y sector_ID forma el código root_ID que sirve para clasificar la información en el servidor según su origen. Además, el agricultor puede crear las operaciones realizadas durante el cultivo del olivar (poda, tratamientos fitosanitarios, tratamientos fertilizantes, desbroce, laboreo, riego, recolección...), los sensores empleados para medir parámetros (presostato, caudalímetro...), los parámetros (caudal, presión, temperatura, humedad, dosis...) y los productos aplicados (glifosato, dimetoato, oxifluorfen...) con el número de registro oficial (Ley 43/2002), el plazo de seguridad (en su caso), o su categoría (herbicida, insecticida...). Las operaciones, sensores, parámetros y productos tienen sus respectivos IDs (operation_ID, sensor_ID, parameter_ID y product_ID. Todos los ID estarán a disposición del

agricultor en la pantalla iOlivetrack-D a bordo de la maquinaria para configurarlos y permitir un correcto registro en combinación con el `root_ID`.

La sección de campo tiene una operación específica por separado, 'Cosecha'. Esta operación tiene especial relevancia por ser el punto de unión con la industria. En esta sección es posible consultar las partidas cosechadas en un sector, con un código de identificación asociado a cada una que incluye la fecha, hora y peso de este. La maquinaria empleada aquí puede ser muy diversa, utilizando desde cosechadoras hasta sistemas asistidos manualmente, pero cada una de estas opciones puede indicarse en el apartado de edición de la operación 'Cosecha'.

En la sección de 'Industrias' (Figura 40. Sección B), la edición de las industrias de recepción de fruto es análoga a la de 'Parcelas', y sirve para identificar las industrias elaboradoras con el correspondiente `industry_ID` a las que llegan las partidas de fruto para su transformación en aceite de oliva o procesamiento como aceitunas de mesa. Además, el productor puede crear todas las operaciones realizadas en la industria (limpieza, cocción, molturación...), los sensores utilizados para su control, los parámetros a medir (temperatura, molestado del fruto, concentración...) y los productos aplicados. Las operaciones, sensores, parámetros y productos tienen sus respectivos `operation_ID`, `sensor_ID`, `parameter_ID` y `product_ID` para permitir un correcto registro en combinación con el `industry_ID`.

Al igual que la sección 'Campo', la sección 'Industria' tiene una operación específica por separado, la 'Generación de lotes'. Los lotes se generan sumando el peso de diferentes partidas de fruto y se les asigna un `lot_ID`. Para cada lote se realizan operaciones de procesado que se registran con sus correspondientes valores y códigos ID. El procedimiento de creación de operaciones es similar al explicado en 'Operaciones de campo', así como el envío de IDs al servidor. Finalmente, la última operación es el envasado, donde se generará un código QR en iOlivetrack-W que se imprimirá en el envase del producto. El código QR se genera a través de la librería con licencia GPL llamada QRCode, que permite traducir la URL del histórico de lotes a un código 2D.

Tanto la sección 'Campo' como la sección 'Industria' disponen de una sección de filtro de consulta (Figura 40. Sección D). Esto facilita la búsqueda en la base de datos filtrando por parcela, sector, operación, fecha y hora, sensor o producto. Además, si iOlivetrack-D dispone de GPS, es posible consultar en un mapa el recorrido seguido por la maquinaria dentro de la parcela. Todos los datos pueden visualizarse o descargarse en formato .csv. Una vez configurados los filtros deseados la información se muestra a través de la sección de 'Resultados' (Figura 3. Sección E).

Por último, en la sección 'Administrador' (Figura 40. Sección C), el usuario administrador puede asignar diferentes permisos sobre las parcelas o las industrias creadas en la base de datos.

2.3 Gestión de la comunicación entre "iOlivetrack-D" e "iOlivetrack-W"

En primer lugar, la comunicación tiene lugar entre la pantalla HMI y el módem. La información configurada en la pantalla por el usuario se transmite al módem mediante una secuencia de tramas. Cada trama enviada sigue una estructura de mensaje de 8 bytes bien definida y un ID de mensaje en la cabecera del mensaje. El primer mensaje (ID 201) contiene la fecha y la hora, el segundo y el tercero (ID 202 y 203) contienen la ubicación, la altitud y la velocidad si iOlivetrack-D dispone de GPS, sino es completada con ceros. El cuarto mensaje (ID 400) contiene los ID de la parcela, sector, operación, sensor y producto. El quinto mensaje (ID 401) contiene el

ID de la variable y su valor. Este mensaje puede repetirse tantas veces como se desee si es necesario registrar más de una variable. El último mensaje (ID 499) se completa con ceros e indica el cierre de la secuencia de tramas. Para registrar correctamente la información es necesario que la secuencia de tramas incluya siempre en su defecto el ID de la parcela origen o sus coordenadas GPS y el ID de la operación. En caso contrario la información se almacenará en el registro de errores de la aplicación web. El resto de IDs (sector, sensor, producto, variables y valor) pueden completarse con ceros ya que son opcionales. iOlivetrack-D dispone de un led que indica el estado de la comunicación entre iOlivetrack-D e iOlivetrack-W. El led verde indica que la comunicación está abierta, y la información se está enviando correctamente. El led rojo indica que la transmisión está interrumpida.

A continuación, el módem recibe la secuencia de tramas y a través del ID de cada mensaje decodifica la información y la transforma en formato XML para enviarla en forma de cadena al servidor. El servidor vuelve a descodificar la información gracias a las etiquetas de formato XML y la registra en la tabla correspondiente de la base de datos. Si alguna trama enviada por iOlivetrack-D contiene un error, iOlivetrack-W lo almacena en un registro de errores donde se puede consultar su estructura y verificar el motivo del error. Estos errores pueden deberse a que la parcela y sector en los postes no han sido leídos por el lector RFID, no ha sido posible vincular la información GPS a una parcela y sector válidos o algún ID de los campos de operación, sensor, producto o variable configurados en iOlivetrack-D no existen en la base de datos.

2.4 Metodología de trabajo

Al iniciar una operación en la parcela, el usuario indica y configura los elementos que intervienen en la operación a realizar (Figura 41). Los datos generados durante la ejecución de la operación serán cargados por iOlivetrack-D a iOlivetrack-W asociados al root_ID donde se está aplicando. Cada vez que se realiza una operación en el sector a lo largo de la campaña se debe repetir este proceso.

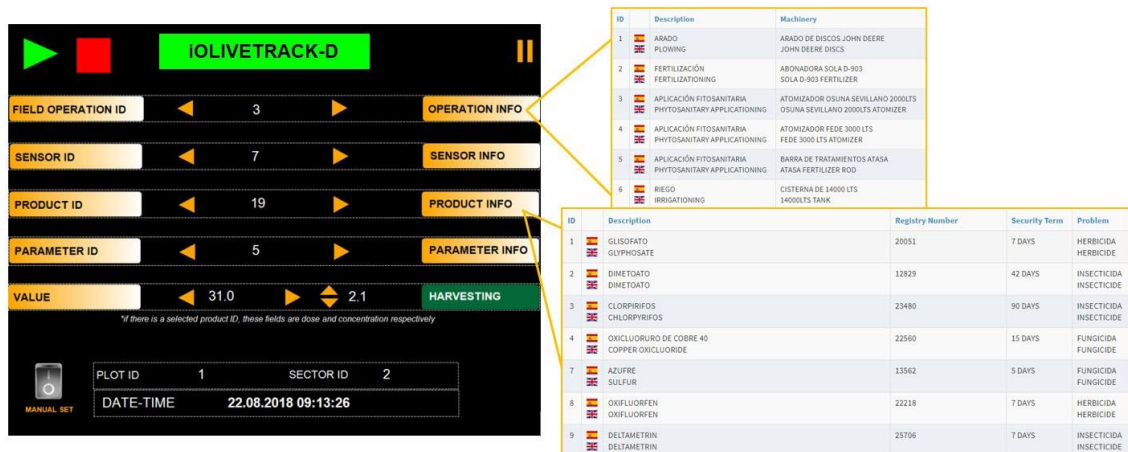


Figura 41. Interfaz HMI utilizada para establecer la configuración que se aplicará en el campo. Ejemplo de opciones disponibles (derecha)

Para generar una clasificación ordenada de los datos, es necesario comunicar a iOlivetrack-W los sectores en los que se está generando la información, y para ello existen dos alternativas propuestas que utilizan la tecnología RFID o GPS. Ambas opciones pueden utilizarse de forma conjunta y complementaria.

- La identificación de sectores mediante tecnología RFID implica la instalación de un poste RFID y la creación previa del código root_ID de cada sector. El poste RFID se orienta

hacia el camino de servicio, según la ruta óptima a seguir al iniciar una operación de campo, de forma que el iOlivetrack-D embarcado en el tractor detectará instantáneamente la etiqueta RFID para asociar la información de la operación de campo con el sector adecuado y, a continuación, cargará los datos en el servidor (Figura 42). En concreto, cuando el operario pasa cerca del poste RFID y pulsa el botón ‘Play’ de la interfaz HMI (Figura 41), el dispositivo lee el root_ID mediante el sistema RFID. A continuación, comienza a enviar los datos de la operación en tiempo real, generando un registro histórico. Una vez leído el root_ID, el RFID permanece inactivo para evitar la detección de postes RFID de sectores adyacentes.

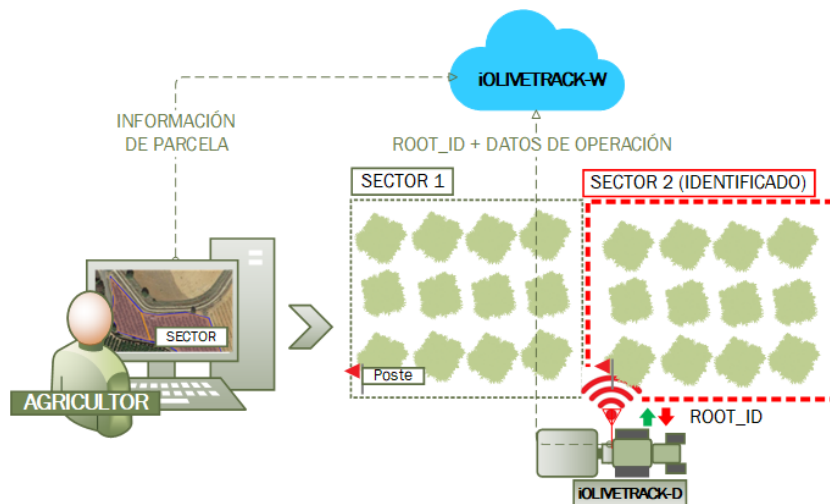


Figura 42. Identificación de sectores mediante tecnología RFID y carga de datos en el servidor.

- La identificación de sectores mediante tecnología GPS implica la instalación de un sistema GPS a bordo del tractor, conectado a iOlivetrack-D, que envía continuamente las coordenadas GPS de la maquinaria con los datos de la operación. Si la ubicación de la maquinaria se encuentra dentro de uno de los sectores definidos, los datos recibidos se asocian al root_ID del sector detectado y éste se muestra en la pantalla de la HMI; en caso contrario, se envían al registro de errores (Figura 43). Para ello se ha utilizado un algoritmo de Ray-casting, que consiste en contar el número de veces que un punto dado cruza los límites de un polígono en una dirección determinada, situándolo dentro del mismo si es impar, o fuera si es par. En este momento, el operario pulsa el botón ‘Play’ (Figura 41) para comenzar a cargar los datos de la operación y las coordenadas GPS de la trayectoria seguida por la maquinaria.

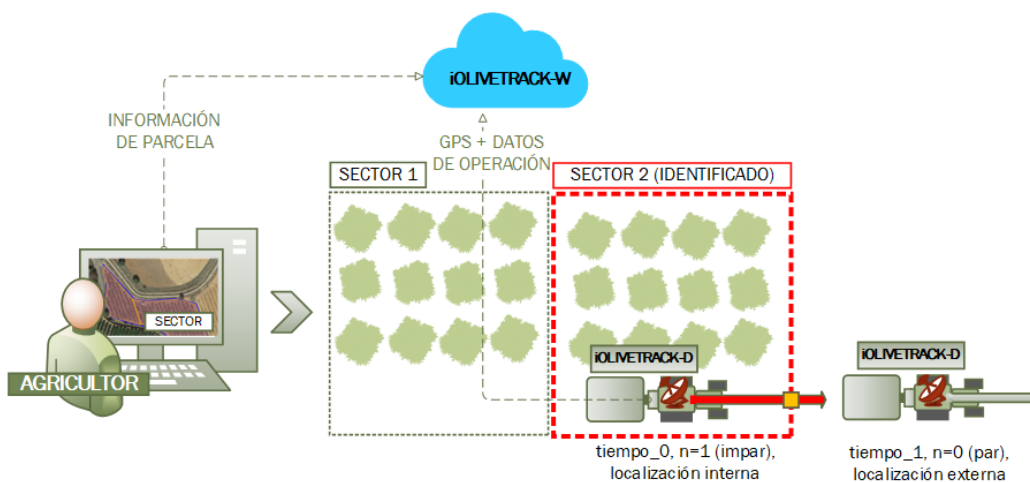


Figura 43. Identificación de sectores mediante tecnología GPS y carga de datos en el servidor.

En ambas opciones, la carga de datos finaliza cuando el operario pulsa ‘Stop’ si la operación ha finalizado o ‘Pause’ si se requiere una pausa en la operación (averías, repostaje, descansos...). Al hacer clic de nuevo en ‘Play’ se reanuda la operación no finalizada en el sector. Al hacer clic en ‘Stop’, la identificación del sector vuelve a ser nula.

La última operación de campo es la recolección que comprende dos etapas, el derribo del fruto y la gestión de este. En general, el procedimiento es similar al utilizado con las demás operaciones de campo, pero existe un botón en la interfaz HMI (Figura 41) que abre una nueva interfaz (Figura 44) donde se pueden ajustar algunas opciones para parameter_ID (presiones, caudal, velocidad...) y sensor_ID en función de la máquina utilizada. La identificación del sector donde se está realizando la recolección se realiza a través de las opciones anteriormente explicadas. Para la segunda etapa, existe un botón de ‘almacenamiento’ para seleccionar el sistema utilizado (*big box*, sacas, ...).

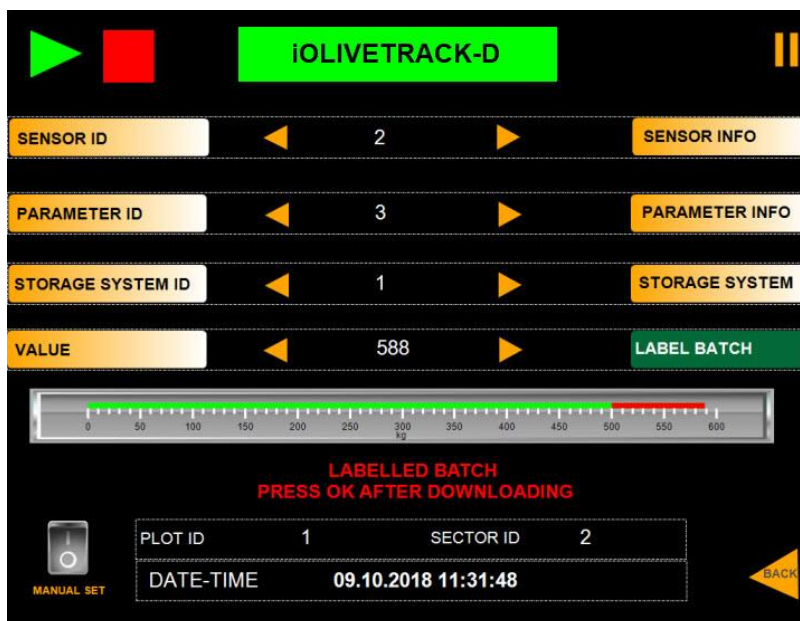


Figura 44. Interfaz HMI, pantalla de recolección, utilizada en la recolección, el almacenamiento y el etiquetado de partidas.

Una vez identificado el sector y configuradas las opciones, el fruto recolectado se carga en el sistema de almacenamiento. En el caso de tener un sistema de pesaje incorporado, será posible controlar el progreso hasta la capacidad máxima mediante la visualización del nivel de llenado. A continuación, debe etiquetarse el sistema de almacenamiento. Para ello, iOlivetrack-D puede incorporar una etiqueta RFID HF en el caso de un sistema de almacenamiento situado en una posición fija, como una tolva, o una etiqueta RFID UHF en el caso de varias unidades independientes, como cajas (Figura 45). Cuando el operario lo considera oportuno se pulsa ‘Label_batch’ (Figura 44) y el RFID escribirá un código batch_ID compuesto por el root_ID + fecha y hora del etiquetado en la etiqueta de cada unidad de almacenamiento. En este momento, iOlivetrack-D envía a iOlivetrack-W la información de la partida de fruto con una trama de batch_ID + peso de esta. Posteriormente, las partidas de fruto se transportan a la industria para su procesamiento mientras se coloca un nuevo sistema de almacenamiento para continuar con la recolección. Una vez finalizada la operación de recolección en el sector y el último etiquetado, el operario pulsa ‘Stop’ y toda la información de la partida se registra en iOlivetrack-W.

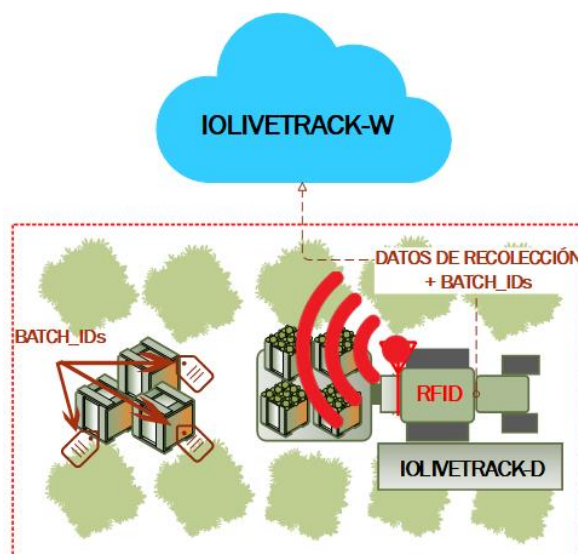


Figura 45. Etiquetado de partidas de fruto recolectado y carga de datos.

Las partidas de fruto cosechadas en campo llegan a la industria y son identificadas por el `root_ID` fijado en sus etiquetas por un lector RFID. La industria crea 'Lots' (Figura 46), según características y demandas, formados por diferentes partidas, y a cada uno se le asigna un código (`package_ID`). De esta forma, un lote puede estar formado por partidas de un solo sector o de varios, pero la información relativa a cada uno de ellos ya está registrada en el servidor. A cada uno de estos lotes se le aplican las 'operaciones' que se requieren en el sector, previamente predefinidas en iOlivetrack-W. Estas operaciones pueden ser diferentes en función de la industria de destino: aceite o aceituna de mesa. La carga de estos datos la realiza iOlivetrack-D de forma análoga a la explicada en la fase de campo. Por último, a nivel de mercado, los consumidores pueden acceder al historial del producto a través de un smartphone u otro dispositivo electrónico con una aplicación para escanear el código QR impreso en el envase. A continuación, estarán conectados a un sitio web con un área para consultar toda la trazabilidad hacia atrás desde el ciclo de producción (Figura 46). Debido a la enorme cantidad de información que se puede registrar, se genera un resumen de las operaciones realizadas donde se puede consultar el sector y parcela de origen, un histórico de las operaciones realizadas, los productos aplicados, y otros parámetros medidos en cada operación con sus valores medios.



Figura 46. Carga de datos a nivel de industria y acceso del consumidor a la información del lote.

2.5 Evaluación de "iOlivetrack-D" e "iOlivetrack-W"

Para evaluar la viabilidad de los sistemas de identificación propuestos, se realizaron diferentes pruebas:

- El dispositivo RFID se probó montando el lector en un tractor y colocando el poste con la etiqueta RFID en un lugar fijo. A continuación, se condujo el tractor en una trayectoria lineal perpendicular a las etiquetas y se modificó la configuración de la antena para evaluar la distancia máxima de lectura, la zona de lectura y la incidencia de la velocidad de avance de la máquina en la lectura.

- El dispositivo GPS se probó montándolo en un tractor. A continuación, el tractor recorre los límites de una parcela que se definió previamente en iOlivetrack-W, a diferente distancia de la línea límite teórica.

Para evaluar el funcionamiento del sistema y la comunicación entre iOlivetrack-D e iOlivetrack-W, se instaló un dispositivo en un tractor de una explotación agrícola y se creó un usuario 'agricultor' y otro 'industria' en la aplicación web. El sistema se probó durante una campaña en un olivar intensivo de aceituna de mesa situado en Almodóvar del Río (Córdoba, España) (37.828244, -4.994502) con una separación entre filas de 6 m y entre árboles de 4 m. Los ensayos de campo se llevaron a cabo siguiendo la metodología descrita en los siguientes pasos:

- En primer lugar, se delimitó la parcela en iOlivetrack-W y se crearon tres sectores (Figura 47). El plot_ID fue 10 y los sector_ID fueron 30, 35 y 36. El sector 30, con la mayor superficie (1.68 ha), se utilizó para realizar las operaciones de campo. Una vez definidos en iOlivetrack-W, el poste RFID con el root_ID adecuado se ubicó en una ruta de servicio de acuerdo con la mejor logística de operaciones. Las etiquetas se colocaron dentro de un rango que diera un umbral mínimo de error de lectura, a una altura de 1.50 m del suelo, con una separación entre 3 y 4 m, y orientadas hacia el camino de servicio por el que circulaba la maquinaria.

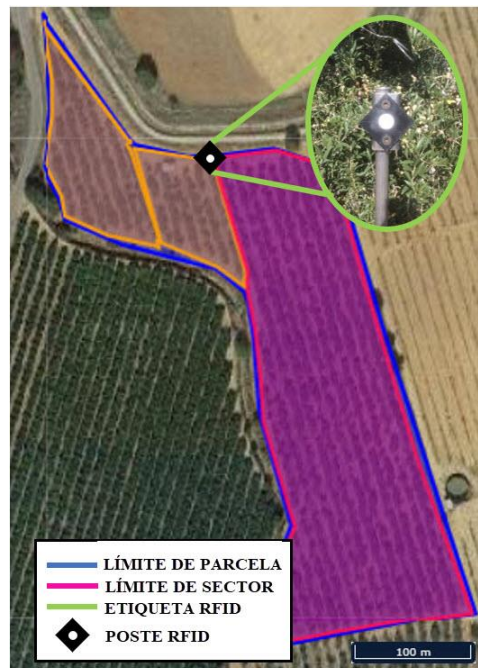


Figura 47. Parcela, sectores y poste RFID probados para la gestión integral de datos en una explotación de olivar

- En segundo lugar, el agricultor creó las operaciones habituales realizadas al cultivo, los parámetros que debían controlarse y los sensores disponibles para medir algunos de estos (Figura 48). A continuación, estas operaciones de campo se realizaron en la parcela utilizando el método GPS para la identificación de la parcela excepto para la recolección que se realizó mediante el método RFID. Esto permite tener el seguimiento de la maquinaria. La operación, el sensor y el producto a registrar en iOlivetrack durante la prueba (Tabla 7) fueron introducidos manualmente por el HMI.



Figura 48. Prueba realizada con iOlivetrack-D a bordo de la maquinaria para cargar los datos de campo en iOlivetrack-W. Ejemplo de identificación de sectores mediante la opción RFID

Tabla 7. Principales operaciones y datos realizados en la prueba de campo con iOlivetrack-D

Operación	Fecha	Producto	Sensor	Parámetro
Recolección	10/2018	-	Célula de carga	Peso
Riego	03-10/2018	Agua	Caudalímetro	Dosis
Fitosanitario	06-09/2018	Oxiclouoruro de cobre 40-0.4% + mancozeb 80-0.3% + mojante - 0.05%.	Caudalímetro	Dosis
Fertirrigación	07-08/2018	Cloruro potásico 60%.	Caudalímetro	Dosis
Fertirrigación	08/2018	Urea 46%	Caudalímetro	Dosis
Fertirrigación	06/2018	Sulfato de magnesio (mg 16% - s 32,5%)	Caudalímetro	Dosis
Fertirrigación	05-06/2018	Sulfato de amonio 21%	Caudalímetro	Dosis
Fitosanitario	03/2018	Glifosato 36-0,3% - oxifluorfenol 20-0,8% - regulador del PH - 0,03%.	Caudalímetro	Dosis
Fitosanitario	03/2018	Oxiclouoruro de cobre 40-0,4% - mancozeb 80-0,3% - stroby - 0,02%.	Caudalímetro	Dosis
Poda	01/2018	-	Ultrasonidos	Distancia

- Durante la fase de recolección (Figura 49), el fruto contenido en las cajas se transfirió a cajas más grandes, de 500 kg de capacidad, con etiquetas RFID adheridas que se encontraban en un remolque instrumentalizado con iOlivetrack-D (Figura 50). Previamente, el tractor había identificado el sector pasando cerca del poste RFID situado en el camino de servicio para la logística. Cuando los *big box* se habían llenado, se pesaron y un operario etiquetó las cinco partidas de fruto haciendo clic en la pantalla, tal y como se ha explicado anteriormente, asignando a cada uno el *batch_ID* correspondiente. A continuación, el tractor transportó las partidas hasta la industria. Esta acción se repitió unas siete veces hasta que la parcela estuvo totalmente cosechada.

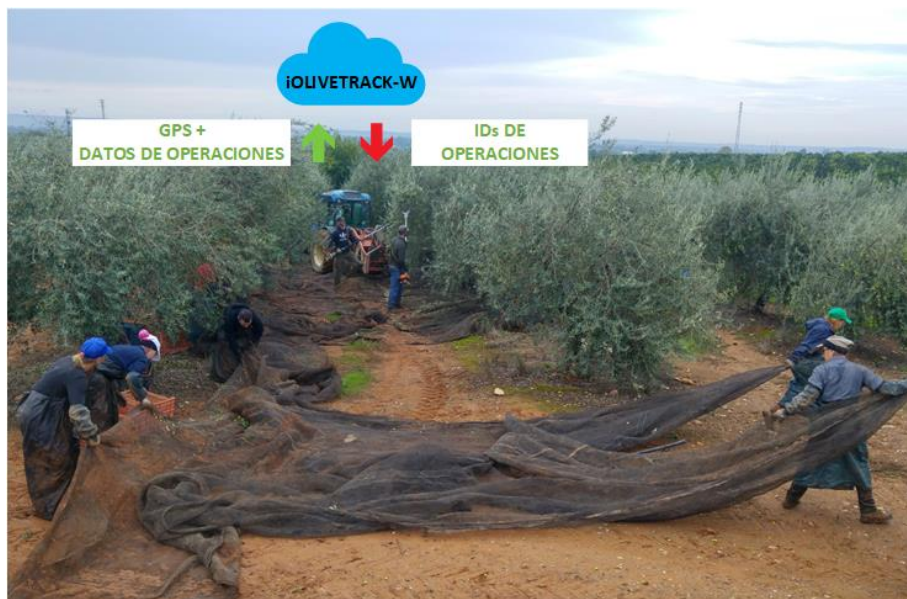


Figura 49. Registro de una operación de cosecha mediante GPS.

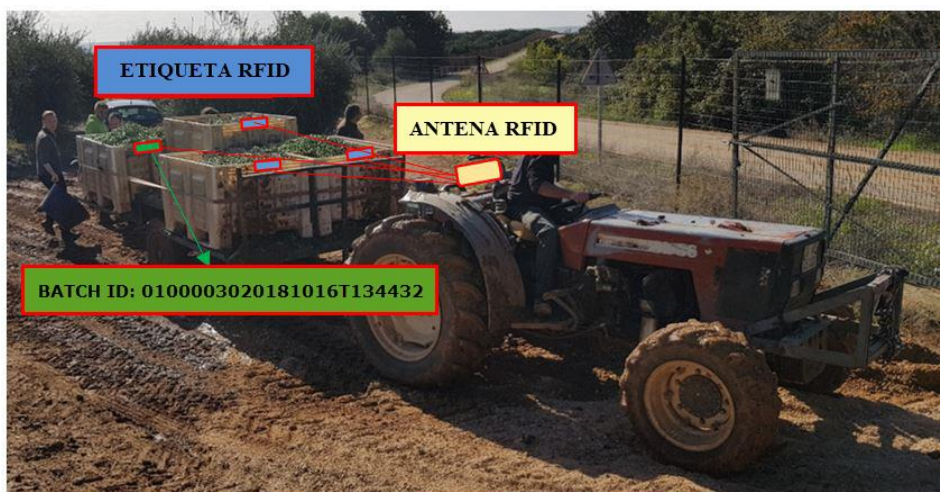


Figura 50. Operación de etiquetado y transporte de partidas de fruto.

- Por último, cuando los diferentes *bigbox* llegaron a industria, un lector RFID registró los lotes en iOlivetrack-W. Dado que la capacidad disponible del fermentador era de 10000 kg, se crearon dos lotes compuestos por diferentes partidas. iOlivetrack-D no se probó en la industria, por lo que las operaciones industriales que se llevaron a cabo en cada lote se simularon introduciendo los datos manualmente mediante iOlivetrack-W, tal y como se ha explicado anteriormente. Los datos fueron proporcionados por la industria. En la última fase del envasado, iOlivetrack-W generó el correspondiente código QR.

3. Resultados

La evaluación de los componentes individuales mostró una adecuada viabilidad de todos ellos para la aplicación de trazabilidad desarrollada. Los dispositivos situados en el exterior del tractor, como la antena GPS con cobertura 3G, la antena RFID y la etiqueta UHF tuvieron un buen comportamiento físico tras las condiciones de trabajo con polvo y lluvia. La caja de conexiones de 0.3×0.5 m situada en la parte trasera del asiento del tractor no supuso un impedimento para el operario durante el trabajo.

Algunos aspectos deben ser considerados en el sistema de identificación de las parcelas:

- Opción RFID: El rango de lectura definido por el fabricante es de hasta 8 m, pero durante las pruebas, el rango adecuado para realizar una lectura con una precisión del 100% fue de 0-4 m, con la antena colocada ortogonalmente a la etiqueta. Este alcance es adecuado para permitir el tránsito de maquinaria cerca del poste RFID sin necesidad de precisión en la aproximación al mismo. A distancias mayores, la etiqueta RFID no se detectó o se hizo con dificultades. Para un mayor alcance de lectura, el fabricante propuso cambiar la antena por una de mayor cobertura y utilizar otras etiquetas. La zona de lectura no correspondía a un cono constante con apertura de 65° a lo largo del eje x e y según la hoja de características del fabricante. A 2 m, la zona de lectura obtenida con un 100% de éxito fue de 116.5° estrechándose progresivamente hasta obtener una de 8.6° a 4 m. Las pruebas de velocidad realizadas en el rango 1-14 km/h fueron totalmente satisfactorias, obteniéndose un 100% de éxito en la lectura de las etiquetas a diferentes velocidades.

- Opción GPS: La precisión obtenida estuvo por debajo del error máximo de 2.5 m que se puede obtener según el fabricante. Se obtuvo un error medio de 0.71 ± 0.32 m, y un punto máximo de 1.75 m. Estos valores deben tenerse en cuenta a la hora de crear sectores contiguos, procurando que la distancia entre los límites de ambos sectores se sitúe en torno a un mínimo de 2 m. Esto evitará problemas a la hora de asociar la información al sector real trabajado.

Durante la operación de campo en campaña de recolección, se verificó la lectura de ambos, RFID y GPS, conectados al iOlivetrack-D a través de los buses de comunicación. La comunicación entre el lector RFID y el visualizador implicó el uso de librerías independientes del fabricante compatibles con Codesys 3.5 SP9 Patch 4 que no estaban disponibles para la versión anterior. En consecuencia, fue necesario actualizar el firmware del visualizador a la última versión disponible (ifm_PDM360NG_V3.3.0) para su correcto funcionamiento.

Los intercambios de información entre iOlivetrack-D e iOlivetrack-W y todos los datos introducidos manualmente por la HMI (Tabla 7) se guardaron correctamente. Cada entrada capaz de intervenir a un nivel (parcela, sector, operación, sensor, producto, variables) fue registrada con su ID correspondiente, lo que ha reducido el tamaño de los mensajes enviados. El buffer implementado en el módem ha permitido adquirir datos a velocidades inferiores a 1 s y almacenarlos en la memoria para que, en caso de pérdida de cobertura o cualquier otro problema de comunicación, no hubiera pérdida de información. Los datos cargados en el buffer fueron de tipo FIFO (First Input First Output) pero para realizar un incremento en tiempo real y no ralentizar el sistema, se comprobó que la velocidad óptima para el módem utilizado era de un envío de datos cada 2 s.

Durante la recolección se produjeron 34 lotes con aproximadamente 19400 kg de aceitunas. Todos los lotes fueron etiquetados correctamente sin ningún problema con el lector RFID. No hubo ningún problema en la inserción de los datos durante el proceso industrial, por lo que se crearon lotes con toda la información relativa a los lotes que contenían. La generación del código por parte de la aplicación web se realizó con éxito. La Figura 51 muestra el código QR que puede ser escaneado para consultar los datos recogidos en las pruebas de campo e industria (los datos históricos no se muestran en el documento debido a restricciones de tamaño). Así, finalmente, el consumidor podría consultar el histórico que contiene la trazabilidad completa del producto adquirido.



Figura 51. Código QR generado en la industria.

La configuración de la pantalla HMI fue poco ergonómica y requiere mejoras gráficas para evitar que el operario navegue entre varias pantallas al definir la operación a realizar. La operación de etiquetado de las cajas por la pantalla durante la recolección fue adecuada a las condiciones habituales de trabajo. La estructura de la interfaz de usuario de la aplicación web resultó cómoda e intuitiva para los agricultores que la utilizaron y el sistema de filtros web una herramienta rápida para consultar los datos requeridos.

La aplicación web desarrollada requirió estar alojada en un servidor web modelo tipo Cloud Next V2 con Windows Server 2016. El rendimiento de la CPU de 2vCore estuvo siempre por debajo del 8% de uso y la RAM de 4 GB por debajo del 14%. El disco duro de 60 GB permite almacenar una gran cantidad de variables de tamaño configurable, por lo que los recursos hardware destinados a la aplicación web fueron suficientes, sin limitaciones. Se deberá evaluar en el futuro ante transmisiones masivas de datos desde diferentes dispositivos iOlivetrack-D y conexiones simultáneas a la web. La programación de la comunicación entre iOlivetrack-D (mediante Java y Codesys) e iOlivetrack-W (mediante ASP.Net) implicó un mayor número de datos para las transmisiones, que a pesar de utilizar el sistema de IDs, necesitan ser rellenados con ceros cuando un campo no requiere ser enviado.

4. Discusión

Las grandes prestaciones del sistema permitieron un registro automático de los inputs implicados en la trazabilidad de la aceituna y gestionar los recursos evitando registros manuscritos o en papel lo que facilitaría la transferencia de información fiable entre los distintos niveles de la cadena de valor (Ruiz-García et al., 2010). El sistema constituiría una potente herramienta para que el agricultor cumplimente el cuaderno de explotación obligatorio (Real Decreto 1311/2012, 2012) y gestione los datos filtrándolos y exportándolos a otros sistemas. Mediante la identificación basada en bases de datos oficiales como el código SIGPAC, la información registrada puede ser utilizada para operaciones y gestiones relacionadas con la administración pública. Cuantas más variables se introduzcan en el ciclo de producción del fruto, mayor será el valor añadido del producto final, lo que permite mejorar la calidad del producto mediante el control de variables importantes, como el seguimiento de la cadena de frío (Abad et al., 2009), entre otras.

iOlivetrack-D con un GPS incorporado permite operaciones de seguimiento más precisas que pueden proporcionar otros resultados interesantes, como mapas de producción o aplicación de productos, rendimiento de la maquinaria, etc. Sin embargo, pueden existir algunos problemas técnicos. Por un lado, el tiempo necesario para el posicionamiento inicial del GPS suele aumentar

sobre el terreno debido a la limitada cobertura móvil. Por otro lado, la precisión del GPS puede ser un aspecto crítico a la hora de identificar sectores contiguos, ya que algunos datos pueden registrarse como asociados a un sector o al adyacente en los casos en que la distancia entre ambos sea pequeña. Para evitar este problema, sería necesario un tipo de GPS más preciso, como el RTK, aunque el coste sería considerablemente mayor. También deben estudiarse otros errores de posicionamiento debidos a la densidad de las hojas de los árboles (Zheng et al., 2005). Además, el GPS podría causar algunas molestias a los operarios que conducen la maquinaria.

La alternativa propuesta con identificación RFID ha reportado resultados satisfactorios con la geolocalización de postes RFID (Ning et al., 2013). No obstante, este método implica establecer previamente una ruta de trabajo adecuada para identificar la parcela al inicio de la operación de campo. El uso de ambos sistemas tecnológicos, tal y como se propone en este trabajo, puede ser complementario (Prinsloo and Malekian, 2016) para obtener mejores resultados en aquellos casos en los que, utilizados individualmente, no ofrecerían las garantías óptimas. Un aspecto a tener en cuenta a la hora de contemplar la implementación de la metodología propuesta es el problema que supone el cambio de las operaciones de trabajo. Los agricultores u operarios tendrían que modificar sus procedimientos y ser más metodológicos, en el sentido de que tendrían que preparar un plan de trabajo adecuado antes de comenzar a trabajar. Este cambio podría ser un problema en las primeras fases de la formación, aunque el desarrollo de una interfaz cómoda y fácil de usar tanto para iOlivetrack-D como para iOlivetrack-W, haría que este cambio fuera menos complicado. El agricultor tendría un control exhaustivo de las entradas (productos aplicados, combustible, agua...) y salidas (frutos por superficie cultivada) de cada parcela o sector definidos. Esto permitiría prever los beneficios o detectar las posibles causas de enfermedades o plagas vegetales. Además, la información asociada a la explotación podría ampliarse añadiendo otros parámetros a registrar a nivel de campo, como variables climáticas (Hamrita and Hoffacker, 2005). Todo ello constituye el origen de la generación de conocimiento y patrones necesarios para la aplicación de técnicas de agricultura de precisión (Suprem et al., 2013).

La implantación del sistema a nivel comercial no supondría un desembolso económico significativo si se compara con las ventajas que se podrían obtener generando valor añadido al producto (Alfaro and Rábade, 2009). En muchos casos, el consumidor podría estar dispuesto a pagar más por un producto acompañado de un sistema de trazabilidad fiable (Zhang et al., 2012). Para ello, la integración de códigos QR es una opción factible para ofrecer información amplia y accesible sobre la trazabilidad del producto en un espacio reducido del envase. La posibilidad de consultar cualquier dato relacionado con el producto que se consume puede aumentar la confianza del consumidor (Chen and Huang, 2013) a través de la transparencia, incrementando así el valor de la marca.

La viabilidad económica del sistema dependerá directamente de los costes impuestos a su distribución, mantenimiento y venta. La tecnología implementada en los dispositivos propuestos podría adaptarse en función de las configuraciones demandadas por el cliente, y según los requisitos de hardware y programación. Una cuestión que debe ser objeto de estudio es el tiempo que el agricultor dedica a gestionar la información generada por la maquinaria y el cultivo. Aunque los inconvenientes de uso del sistema pueden hacer que no se implante de forma generalizada, previsibles medidas más estrictas de calidad o seguridad alimentaria podrían ser el catalizador para su aceptación y adopción generalizada.

A nivel de intercambio campo/industria, el procedimiento propuesto tiene un fuerte potencial de optimización de los recursos implicados en la logística, con la clasificación automática de partidas de fruto y la creación de lotes. La información transferida a la industria

desde el campo mejorará en términos de fiabilidad y precisión. Las partidas procesadas en la industria podrán ser redimensionadas y formados por partidas del mismo origen, para permitir un control más estrecho y reducir los problemas de seguridad alimentaria. Aunque en este trabajo se ha simulado este proceso, se implementaría una conexión automática instalando un dispositivo similar con PLC y módem GPRS para registrar cada operación industrial.

La distribución también representa una fase importante en la cadena de suministro de cualquier producto. Así, en caso de cualquier problema, será posible identificar rápidamente el historial del producto y otros lotes implicados siguiendo la trazabilidad hacia atrás. El registro histórico de actividades representa una garantía de calidad y seguridad alimentaria en cualquier sistema de trazabilidad, más aún en productos de consumo que utilizan productos de naturaleza tóxica que pueden ser perjudiciales para la salud si no se manipulan o controlan adecuadamente, como es el caso de los productos fitosanitarios (Martínez Nieto et al., 2009). La utilización de un sistema de trazabilidad fiable dotará al sector de mayor confianza y eficacia en la gestión de incidencias.

El sistema de trazabilidad aquí desarrollado podría considerarse como un punto de partida para la implantación de la tecnología blockchain de acuerdo a sus principios básicos, la existencia de una plataforma común compartida por todos los actores de la cadena de suministro (Lu and Xu, 2017). Esto ayuda a prevenir riesgos y aportar soluciones a los problemas que puedan surgir (Tian, 2017), garantizando la veracidad e incorruptibilidad de la información desde el campo hasta el consumidor. Así, se abre una amplia diversidad de opciones para la implementación del sistema desarrollado.

Capítulo 6

Sistema de limpieza, clasificación por lotes y trazabilidad entre campo e industria en la recolección mecanizada de aceituna de mesa

1. Introducción

En el sector del olivar, la gestión de la trazabilidad comienza normalmente en la industria durante la recepción del fruto. En el olivar de mesa, la situación es similar y no se cuenta con una conexión campo-industria adecuada, con el agravante de la necesidad de limpiar y clasificar las partidas de fruto en la planta industrial (entamadora) para así seleccionar el fruto procesable como aceituna de mesa y descartar aquel que debe enviarse a una almazara para la producción de aceite. La selección en la industria implica una dificultad añadida para el registro de la trazabilidad, ya que, al no diferenciar de forma precisa el fruto procedente de diferentes orígenes, se pierde información que puede haber sido previamente registrada en campo.

Adicionalmente, en la recolección y logística posterior del fruto, no se suele realizar ningún tipo de operación postcosecha antes de enviar el fruto a la industria. No existen sistemas portátiles para campo que integren en una misma máquina las etapas de procesado del fruto cosechado: recepción, limpieza, clasificación y almacenamiento, de manera que puedan ser ubicados de forma ágil en la explotación. Se pueden encontrar algunos sistemas aislados que tratan de ofrecer solución de forma independiente a las operaciones anteriormente mencionadas, aunque esto supone una complejidad añadida para la gestión del fruto. Además, es conveniente reducir, en la medida de lo posible, el número de estas operaciones de gestión posteriores al derribo del fruto y, si se opta por el transporte en líquido, el tiempo que pasa el fruto en seco, para evitar el aumento del molestado.

Por todo ello, el sector de la aceituna de mesa tiene gran potencial de mejora en materia de calidad y trazabilidad del fruto. En el marco del Proyecto de Compra Pública Precomercial (CPP) INNOLIVAR, la Universidad de Córdoba, en colaboración con la empresa Integración Sensorial y Robótica (ISR), ha diseñado un sistema portátil, consistente en un remolque para su uso en campo, que permite realizar la limpieza, clasificación y registro de la trazabilidad de lotes de frutos recolectados. Este prototipo va acompañado de otro remolque consistente en un sistema de almacenamiento, aislado térmicamente, que incorpora un líquido refrigerado para la conservación de los lotes de aceitunas que se enviarán para su elaboración en la entamadora. Los dos remolques están conectados a un sistema de computación en la nube, compartido con la maquinaria usada para las operaciones de campo, que se emplea en registrar información sobre la trazabilidad del fruto desde el campo hasta la industria (Figura 52). Por tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar la viabilidad o rendimiento de estos sistemas para conectar las operaciones de campo, tras la recolección, con la industria, diferenciando calidades de aceituna y manteniendo la trazabilidad del producto.



Figura 52. Metodología para gestión de la calidad y trazabilidad en campo

2. Materiales y métodos

En esta sección se describe el prototipo desarrollado formado por un conjunto de dos remolques junto con las tecnologías integradas en ellos (sección 2.1). También se detalla el software desarrollado para realizar las funciones para las que se han diseñado (sección 2.2) así como la metodología de trabajo (sección 2.3).

2.1 Hardware

2.1.1 Prototipo desarrollado

El conjunto comprende dos remolques arrastrados, uno dedicado a las labores de recepción, limpieza y clasificación (TRCS) y otro para el almacenamiento en campo y transporte a la industria (TST) (Figura 53). El primero puede ser arrastrado por un tractor u otro tipo de vehículo, tiene dimensiones autorizadas para el transporte por carretera (7x4x2.5 m) y permite ser ubicado en un punto de una parcela cercano a la zona donde se está efectuando la recolección para reducir el tiempo empleado en el transporte de fruto al punto de acopio. Sobre el remolque se ubica una tolva para la recepción con capacidad de aproximadamente 3 m³ que descarga el flujo de fruto sobre una cinta elevadora hacia una perdigonera de rodillos con una separación de 12 mm entre ellos que retira aquellos de pequeño diámetro (perdigón) no comercializable para aceituna de mesa. Este fruto cae sobre una cinta auxiliar que descargará finalmente el perdigón sobre una cinta de salida para el descarte. Posteriormente, mediante una sopladora, el flujo de fruto es limpiado de hojas y pequeñas ramas y éste cae sobre la despalilladora que termina la fase de limpieza quitando las ramas más grandes. A continuación, el flujo que ha atravesado la despalilladora entra a la cinta de clasificación y se divide entre las 16 calles separadas físicamente. En esta cinta el flujo de fruto pasa a través del sistema de clasificación que realiza la evaluación fruto a fruto y, al final de ella, aquellas aceitunas con una evaluación negativa son retiradas del flujo inicial mediante unas boquillas que expulsan aire comprimido a 6 bar de presión. De esta forma, las aceitunas descartadas cambian su trayectoria cayendo en la cinta de salida de calidad 'B' o descarte uniéndose en ella con el perdigón retirada en la fase de limpieza. El flujo de fruto restante, que es aquel con calidad 'A' o apta, cae por gravedad y siguiendo su trayectoria natural

hacia otra cinta de salida que descarga sobre el remolque de transporte con líquido precargado y refrigerado en industria. El remolque TST tiene unas dimensiones de 5.7x2x2 m y porta sobre su estructura un bidón aislado térmicamente con capacidad de 4 m³, equivalente a 2.000 kg de fruto aproximadamente considerando una densidad de fruto de 700 kg/m³ y una precarga de líquido de 1.2 m³. La carga de fruto se efectúa por una abertura circular de 50 cm de diámetro en la parte superior del bidón y la descarga por gravedad en la parte trasera del bidón mediante la apertura de una válvula manual de bola de PVC.

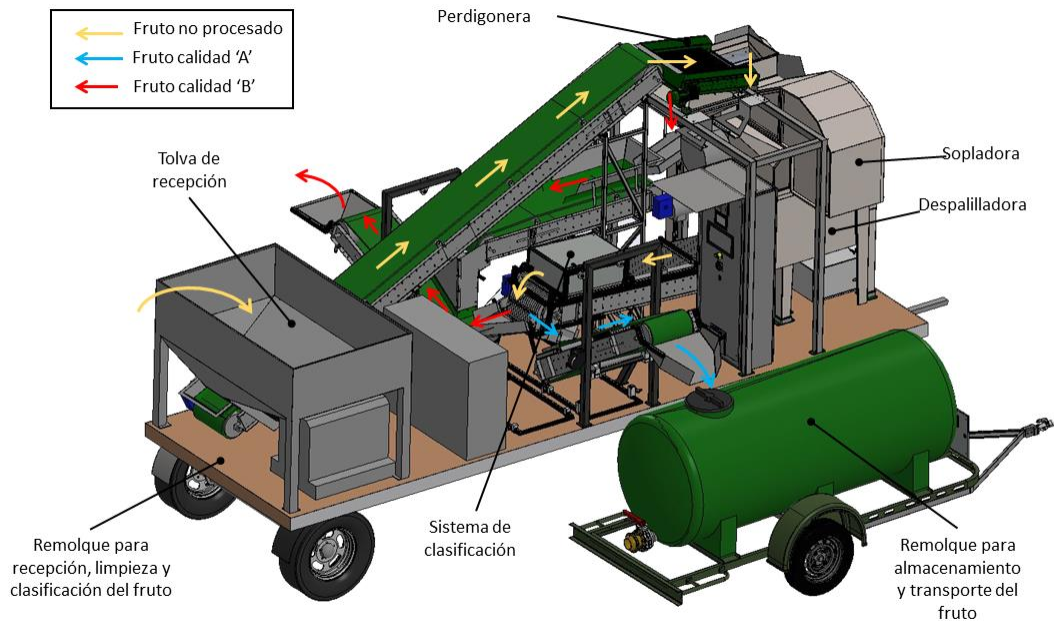


Figura 53. Remolque TRCS para las operaciones de recepción, limpieza y clasificación y remolque TST para el almacenamiento y el transporte a la industria. Las flechas indican el flujo de fruto sin clasificar y el flujo de cada calidad, A y B.

2.1.2 Tecnologías integradas

El remolque TRCS está controlado principalmente mediante un PC y un PLC (Programmable Logic Controller) (Simatic ET 200S, Siemens, Germany) interconectados mediante Ethernet. El PLC se encarga de la activación/desactivación de los distintos motores que controlan las cintas transportadoras a través de variadores de frecuencia (L510s, TECO, Australia). Adicionalmente, el control y monitorización del estado de las cintas transportadoras, así como los motores de los sistemas de limpieza se realizan mediante una pantalla táctil HMI (Human-Machine Interface) (6AV2123-2GB03-0AX0, Siemens, Germany). El PC gestiona el resto de los procesos a bordo del TRCS, entre los que se encuentran la clasificación, el pesado, la identificación de los lotes, la georreferenciación y el envío de los datos generados a una aplicación para su registro y visualización. El sistema de clasificación consta de 16 módulos independientes que controlan el proceso de clasificación de las 16 calles. Cada módulo está formado por una placa microprocesadora de 2 GB de RAM (Raspberry Pi 4, Raspberry Pi Foundation, United Kingdom), una cámara de 5MP (OV5627, Raspberry Pi Foundation, United Kingdom), una base de 16 relés y 16 electroválvulas de alta frecuencia (SX11F-HH, SMC, Japan). Para la iluminación se ha empleado 2 barras LED de 0.5 m de longitud de 3500 lm. La captura de imágenes está comandada por un sensor fotoeléctrico (VTE180-2P42442, Sick, Germany) que detecta los huecos de las cintas donde se pueden situar las aceitunas y ordena capturar las imágenes en el

momento oportuno evitando la desincronización. Cada uno de los módulos está comunicado con el PC mediante un switch para enviar la información extraída de los frutos y recibir los parámetros de configuración y órdenes de clasificación. La georreferenciación de ambos remolques se realiza a través de un sistema GNSS (DIYmalls, VK-162, China) con conexión USB e integran un sistema de identificación mediante RFID con un lector UHF (Ultra High Frequency) situado a bordo del remolque TRCS (CF-RU5309, Chafon, Shenzhen) que detecta y realiza la lectura de un tag pasivo EPC Gen2 localizado en el paragolpes del remolque TST. De esta forma el remolque que transporta los lotes de frutos de calidad ‘A’ queda permanentemente identificado en campo y en la industria mediante el ID asociado al lote. El peso del lote es monitorizado mediante unas básculas (PRS-10T, GRAM, Spain) conectadas a un lector (MK3, GRAM, Spain) con conexión por RS232 al PC para lectura de los datos. Por su parte, el remolque TST tiene una placa microprocesadora de 2 GB de RAM (Raspberry Pi 4, Raspberry Pi Foundation, United Kingdom) a la que se conecta el sistema GNSS (DIYmalls, VK-162, China) mediante conexión USB y una sonda de temperatura PT100 (174-7517, RS PRO, United Kingdom) para monitorizar el líquido de transporte. La evolución de la temperatura de este líquido es monitorizada en tiempo real por el operario en una pantalla táctil de 7” (Raspberry Pi Touchscreen, Raspberry Pi, United Kingdom) de cara a garantizar las propiedades de la solución y la conservación óptima de las aceitunas hasta la llegada a la industria. Los datos de generados en ambos remolques son registrados en una base de datos para su análisis y visualización mediante sendos módems 3G/4G (WE826-T2, Cioswi, China). En la Figura 54 se observa la interconexión de los diferentes elementos de ambos remolques.

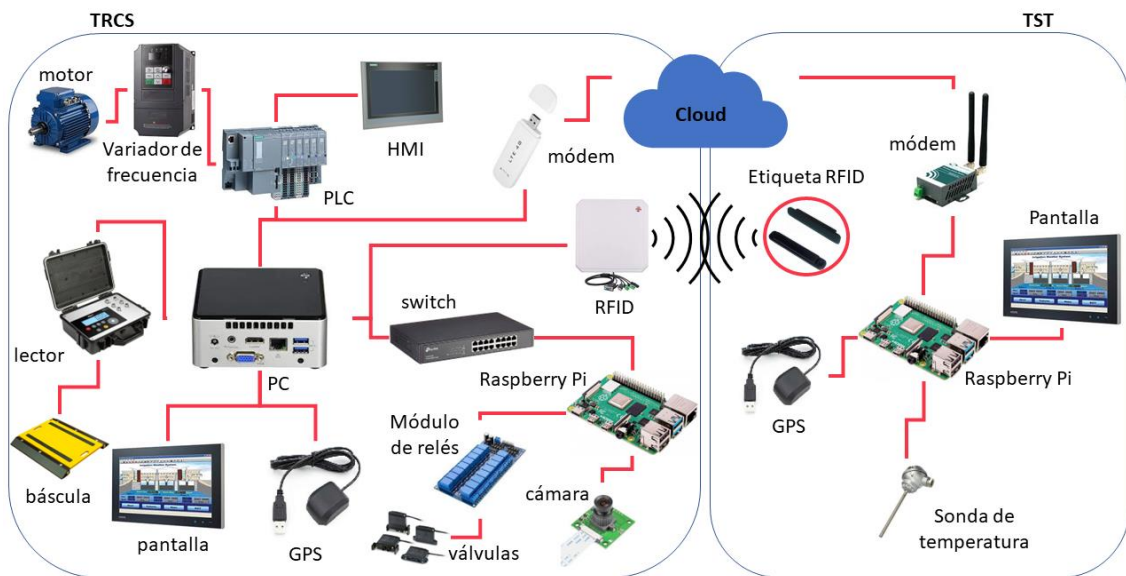


Figura 54. Interconexión electrónica de los diferentes elementos entre ambos remolques, TRCS y TST

2.2 Software

Para el funcionamiento de los prototipos se han desarrollado varias aplicaciones para el control de las diversas funciones del remolque TRCS y TST, así como del registro y visualización de la información generada y su transferencia a la industria.

2.2.1 Algoritmo de clasificación

El algoritmo de clasificación ha sido desarrollado en Python 3.7 y se ha utilizado como base para la evaluación de los parámetros de clasificación la librería OpenCV. El diagrama de flujo definido para el algoritmo está detallado en la Figura 55. A continuación, se detallan las

fases que conforman el ciclo de programa para la evaluación de las aceitunas en cada una de las calles del sistema de clasificación:

1. Captura de imagen y detección de aceituna:

El algoritmo comienza con la lectura del sensor fotoeléctrico que se encarga de autorizar la captura de una imagen en el momento exacto en formato RGB con una resolución de 96 dpi y una configuración de la cámara determinada (ISO=800, frameRate=90, shutterSpeed=250 y awbGain=3.0). La imagen es enviada a la aplicación de PC dedicada a la visualización de imágenes y datos mientras que, paralelamente, la placa microprocesadora procesa la imagen para detectar la presencia o no de fruto en ella. Para ello, la imagen se convierte a escala de grises y se aplica un threshold de valor 85 para binarizar e invertir seguidamente la imagen. Posteriormente, pequeñas áreas de la imagen son retiradas mediante una operación de opening (erosión + dilatación). Luego el número de píxeles con valor diferente a 0 es contado para calcular los correspondientes a una aceituna. Por tamaño del fruto respecto de la imagen capturada, se ha fijado que una aceituna debe tener un número de píxeles entre 10000 y 70000 píxeles, por lo que de esta manera se puede confirmar la presencia o no de fruto. Si no hay fruto se desecha la imagen y si lo hay se continúa con la fase 2.

2. Evaluación del área de fruto:

Una vez que el fruto ha sido detectado se evalúa el área proyectada de este. Para ello, se multiplica el número de píxeles por un factor de escala de 0.00479 mm/píxel, que devuelve el área del fruto en mm². Posteriormente se compara esta área con un valor de referencia (100 mm²) correspondiente al área de un fruto considerado por la industria como perdigón. Si el resultado de esta comparación es que el área del fruto es mayor al valor de referencia, el fruto es considerado válido y se continúa con la fase 3, de lo contrario, el fruto es considerado perdigón y debe ser descartado. En ese caso, el algoritmo no continúa evaluando el grado de madurez ni el molestado y pasa directamente a la fase 5.

3. Evaluación de la madurez:

Para la evaluación de la madurez se aplica una operación AND entre la imagen binaria del fruto obtenida anteriormente y el canal verde de la captura original. El resultado es otra imagen (máscara) donde el fruto está representado solamente por el canal verde y el fondo tiene valor 0 en cada píxel. Realizando el sumatorio de valores de todos los píxeles de la máscara y dividiendo entre el número de píxeles de fruto hallado anteriormente se obtiene un valor promedio de color en el canal verde. Como última operación se realiza la conversión a nivel de madurez (%) tomando como valores de referencia previamente guardados los correspondientes a un fruto verde y negro usando la siguiente expresión (1).

$$\text{nivel de madurez} = \left(1 - \frac{A - R_N}{R_V - R_N}\right) \cdot 100 \quad (1)$$

Donde A es el nivel medio del canal verde de la aceituna evaluada, R_N es el nivel medio del canal verde de una aceituna negra y R_V es el nivel medio del canal verde de una aceituna verde. Para obtener previamente los niveles de referencia y calibrar el sistema de clasificación se requiere pasar un número significativo de aceitunas que se consideren completamente verdes y otras completamente negras. Realizada la operación de cálculo del nivel de madurez, este se compara con un valor de referencia (50) empleado para tomar la decisión de descartar o no el fruto. Si el nivel de madurez es superior al valor de referencia, el fruto es descartado pasando directamente a la fase 5 y, si es inferior, se continúa con la siguiente fase de evaluación del nivel de molestado (fase 4).

4. Evaluación del molestado

Este proceso se realiza únicamente con aceitunas verdes que han pasado la fase anterior. Para la evaluación del molestado, la captura original en RGB se convierte al espacio de color HSV y se selecciona el canal S (Saturación) que permite resaltar la mancha. La imagen de la canal S es binarizada aplicando un valor de threshold (110) y posteriormente se realizan operaciones de erosión y dilatación para quitar ruido y suavizar los contornos de fruto y manchas de molestado. Seguidamente, se elimina el fondo y se crea una máscara del fruto sin fondo. Mediante una operación AND con el canal S y la máscara del fruto se aísla el molestado. A continuación, se aplica un valor de threshold en un intervalo para los píxeles con valores entre 1 y 200. Finalmente, se cuentan los píxeles que corresponden a molestado y, mediante el número total de píxeles que corresponden al fruto completo, se calcula el porcentaje de molestado respecto del fruto total. Este porcentaje es comparado con un valor de referencia del 5% para decidir si el fruto es descartado o no (Sola-Guirado et al., 2022). Si el porcentaje de molestado es superior al valor de referencia, el fruto será descartado en la fase 5. Si el valor es inferior, continuará el recorrido del flujo de fruto con calidad 'A'.

5. Soplado:

En esta fase el fruto con un área superior al umbral establecido o con un nivel de madurez superior al valor de referencia o con un porcentaje de molestado también superior al valor de referencia es soplado mediante un chorro de aire comprimido cuya duración es igual al tiempo desde que el sensor detecta un flanco de subida en la cinta hasta el siguiente flanco de subida. De esta forma son desviados de la trayectoria natural para caer sobre la cinta de salida de calidad 'B'. El resto de los frutos considerados válidos seguirán una trayectoria natural para caer en la cinta de salida de calidad 'A'.

6. Envío de datos:

Esta fase es ejecutada paralelamente con la fase 5. Una vez que se ha terminado de evaluar cada fruto, los datos extraídos relativos a área, madurez y molestado son enviados a la aplicación de PC para su gestión y visualización en la interfaz desarrollada.

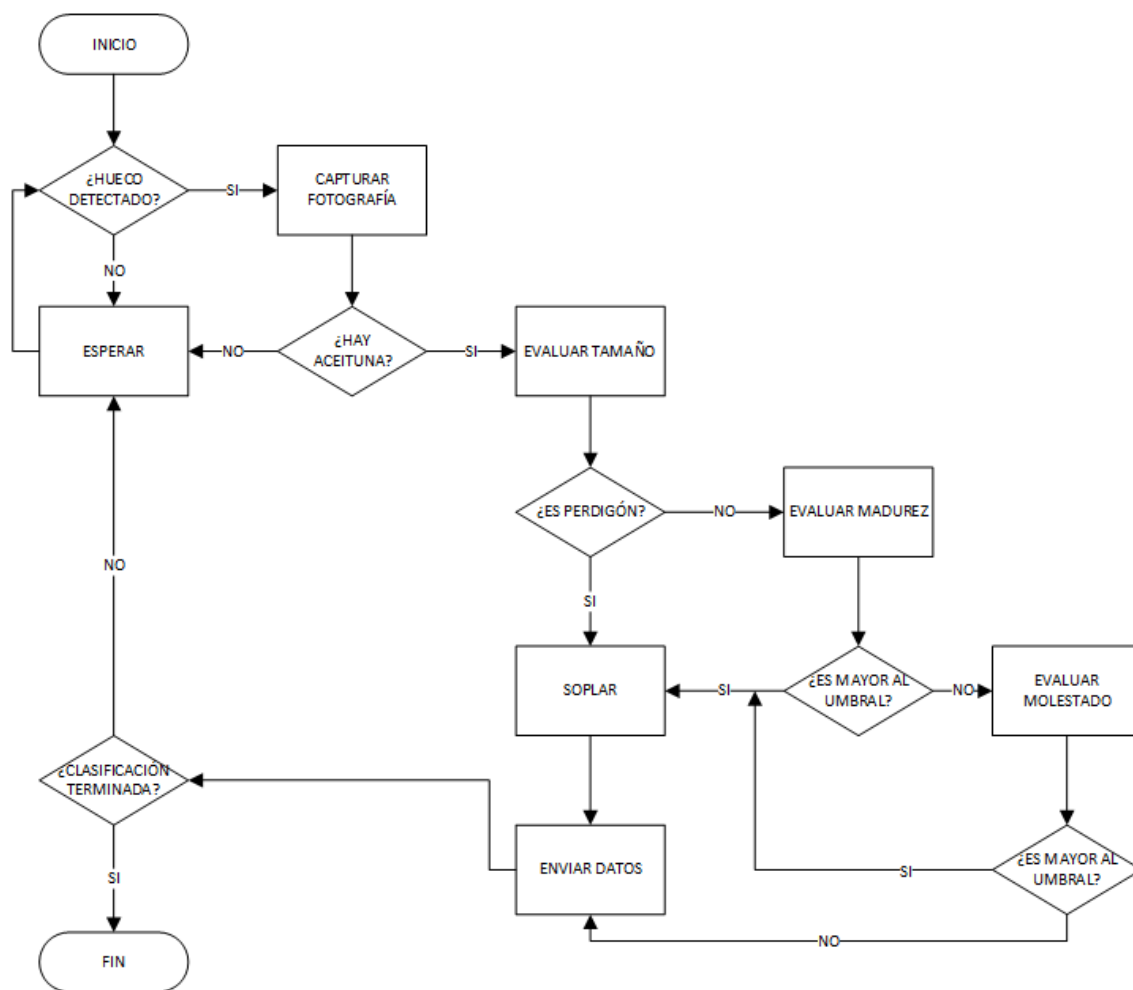


Figura 55. Diagrama de flujo para el algoritmo de clasificación

2.2.2 Interfaz para monitorización y clasificación

La aplicación de control de la trazabilidad consta de 5 módulos ("Planificación", "Trazabilidad", "Costes" y "Usuarios") que comprenden distintas funciones (Figura 56). El módulo "Planificación" consta de diferentes secciones (operaciones, parcelas, maquinaria, productos, industrias y meteorología). En la sección 'Parcelas', el usuario crea las parcelas en las que se pueden realizar las operaciones con sus características. En el apartado 'Maquinaria', el usuario tiene la posibilidad de dar de alta la maquinaria utilizada con sus especificaciones. En el apartado 'Productos', el usuario puede dar de alta los productos utilizados habitualmente con número de registro y dosis aplicada en operaciones como fertilización o aplicaciones fitosanitarias. En la sección "Industrias", el usuario puede registrar las fábricas de transformación que reciben los lotes de fruto y sus respectivas ubicaciones. En 'Meteorología', el usuario puede consultar información sobre las estaciones meteorológicas cercanas, así como las previsiones meteorológicas para los próximos días. Por último, en la sección 'Operaciones', el usuario puede crear una operación para asociar la parcela, la maquinaria, los productos o las industrias implicadas con el fin de crear la trazabilidad del producto desde el campo. El módulo 'Trazabilidad' consta de 2 secciones, 'Lotes' y 'Transporte'. En la sección 'Lotes', el usuario puede consultar la trazabilidad de los lotes procesados mediante un identificador, la hora de inicio y fin del procesado, los parámetros asociados (superficie media, nivel de madurez, índice de molestado y peso), el identificador de la maquinaria utilizada para la recolección y la industria de destino. En el apartado 'Transportes', el usuario puede consultar los transportes realizados, los lotes transportados en ellos y la ruta seguida hasta llegar a su destino. El módulo de costes tiene 2

secciones, 'Informes' y 'Ajustes'. En el apartado 'Costes', el usuario puede asignar un coste horario a cada operario y máquina utilizada durante las distintas operaciones, de forma que en el apartado 'Informes' se puede obtener de forma simplificada el coste total de cada operación, considerando personal y maquinaria. Por último, en el módulo 'Usuarios', el usuario puede crear diferentes perfiles y asignarles permisos para acceder a la información registrada en la base de datos de la aplicación. Así, en función del permiso obtenido (operario, administrador o industria), se podrá acceder a diferente información y realizar funciones de consulta, edición o borrado. Para la industria, este perfil sólo permite la consulta del ciclo productivo donde se muestra la trazabilidad completa del fruto.

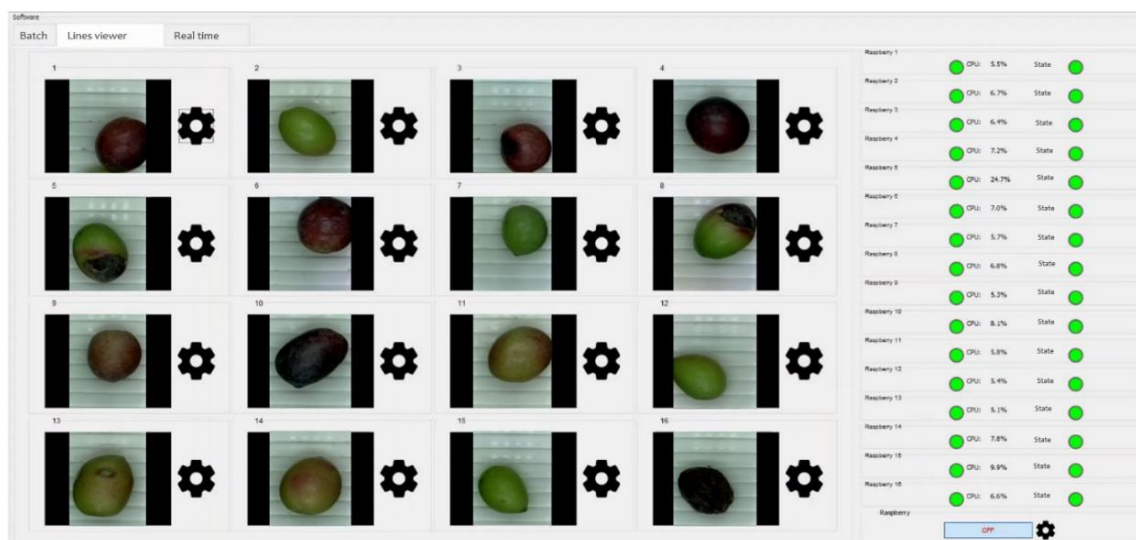
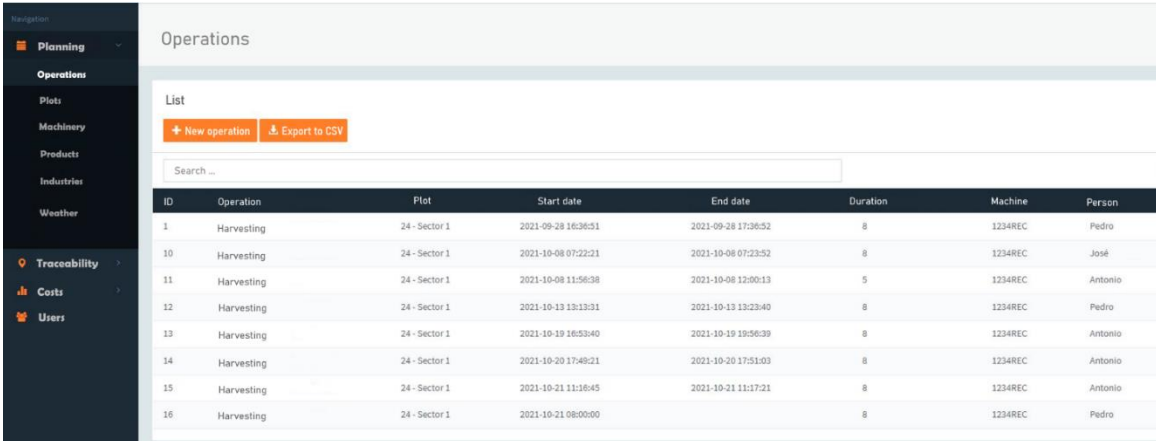


Figura 56. Interfaz de la aplicación desarrollada para el control de la clasificación de los lotes de fruto

2.2.3 Aplicación para registro de la trazabilidad

La aplicación para el control de la trazabilidad consta de 5 módulos ('Planificación', 'Trazabilidad', 'Costes' y 'Miembros') que comprenden diferentes funciones (Figura 57). El módulo de 'Planificación', a su vez, consta de diferentes apartados (actividades, fincas, maquinaria, personas, productos, industrias y meteorología). En el apartado de 'Fincas', el usuario crea las fincas sobre las que puede realizar las actividades con las características que ésta posee. En el apartado de 'Maquinaria', el usuario tiene la posibilidad de dar de alta la maquinaria que usa con las especificaciones que tenga. En el apartado de 'Personas', el usuario puede dar de alta el personal que tiene a cargo para la realización de las diferentes actividades. En el apartado de 'Productos', el usuario puede dar de alta los productos que habitualmente utiliza con número de registro y dosis aplicada en actividades como la fertilización o las aplicaciones fitosanitarias. En el apartado de 'Industrias', el usuario puede dar de alta aquellas industrias de procesamiento que reciben el fruto mediante los lotes procesados y sus respectivas ubicaciones. En 'Meteorología', el usuario puede consultar la información de estaciones meteorológicas cercanas, así como las previsiones de tiempo en los próximos días. Por último, en el apartado de 'Actividades' el usuario puede crear una actividad a la que puede asociar la finca, maquinaria, personas, productos o industrias involucradas en dicha actividad para ir conformando la trazabilidad del producto desde el campo y a lo largo de todo el histórico de producción. El módulo de 'Trazabilidad' consta de 2 apartados, 'Lotes' y 'Transportes'. En el apartado de 'Lotes' el usuario puede consultar la trazabilidad de los lotes procesados mediante un identificador, hora de inicio y fin del procesamiento, parámetros asociados (área, madurez, molestado y peso), el identificador de la cosechadora empleada para su recolección y el destino o industria de esos lotes. En el apartado de 'Transportes', el usuario puede consultar los transportes realizados, los lotes transportados en

ellos y la ruta seguida hasta llegar a la industria destino. El módulo de costes consta de 2 apartados, 'Informes' y 'Ajustes'. En el apartado de 'Ajustes' el usuario puede asignar un coste horario a cada operario y máquina utilizada durante la realización de las diferentes actividades. De esta forma, en el apartado 'Informes' se puede obtener de forma simplificada el coste total que implica cada actividad teniendo en cuenta personal y maquinaria. Finalmente, en el módulo 'Miembros', el usuario puede crear diferentes perfiles y asignarles permisos para el acceso a la información registrada en la base de datos de la aplicación. Así, en función del permiso obtenido (operario, administrador o industria) se podrá acceder a diferente información y realizar funciones de consulta, edición o eliminación. En el caso de la industria, dicho perfil sólo permite la consulta del ciclo de producción donde se muestra la trazabilidad completa del fruto.



ID	Operation	Plot	Start date	End date	Duration	Machine	Person
1	Harvesting	24 - Sector 1	2021-09-28 16:36:51	2021-09-28 17:36:52	8	1234REC	Pedro
10	Harvesting	24 - Sector 1	2021-10-08 07:22:21	2021-10-08 07:23:52	8	1234REC	José
11	Harvesting	24 - Sector 1	2021-10-08 11:56:38	2021-10-08 12:00:13	5	1234REC	Antonio
12	Harvesting	24 - Sector 1	2021-10-13 13:13:31	2021-10-13 13:23:40	8	1234REC	Pedro
13	Harvesting	24 - Sector 1	2021-10-19 16:53:40	2021-10-19 19:56:39	8	1234REC	Antonio
14	Harvesting	24 - Sector 1	2021-10-20 17:48:21	2021-10-20 17:51:03	8	1234REC	Antonio
15	Harvesting	24 - Sector 1	2021-10-21 11:16:45	2021-10-21 11:17:21	8	1234REC	Antonio
16	Harvesting	24 - Sector 1	2021-10-21 08:00:00		8	1234REC	Pedro

Figura 57. Interfaz de la aplicación desarrollada para el control de la trazabilidad de los lotes de fruto

2.3 Metodología

La metodología de trabajo propuesta supone el registro de todas las operaciones previas (tratamientos fitosanitarios, poda, riego, fertilización, etc.) llevadas a cabo en campo mediante la aplicación de control de la trazabilidad ejecutada desde un dispositivo móvil (smartphone o Tablet). Posteriormente, se realiza el transporte de las partidas de fruto recolectadas hacia el punto de acopio por parte de la maquinaria encargada de esta tarea en el campo (tractores con remolque, con palas o cosechadoras integrales). En todas estas operaciones las coordenadas geográficas han sido registradas gracias al GPS del dispositivo móvil. En el punto de acopio cada partida de fruto es descargada en la tolva de recepción del remolque TRCS y procesada realizando la limpieza. En este momento se comienza la generación de un lote con un ID asociado a la partida de fruto y se realiza la clasificación en una determinada calidad. Antes del almacenamiento del fruto, el remolque TST es identificado mediante la etiqueta RFID y asociado al ID del lote que se está procesando. Posteriormente, los lotes son almacenados en el remolque TST y son transportados a la entamadora (calidad 'A') o a la almazara (calidad 'B') mediante otro medio de transporte. Esta operación junto a la ruta seguida a la entamadora también es registrada mediante la misma aplicación. En todo el proceso el registro de la calidad y la trazabilidad es asegurado mediante conexión de los dos remolques a la nube. Finalmente, la industria receptora de los lotes puede acceder a la información asociada a ellos a través de la aplicación desarrollada y adjuntarla a la generada en sus instalaciones (Figura 58).

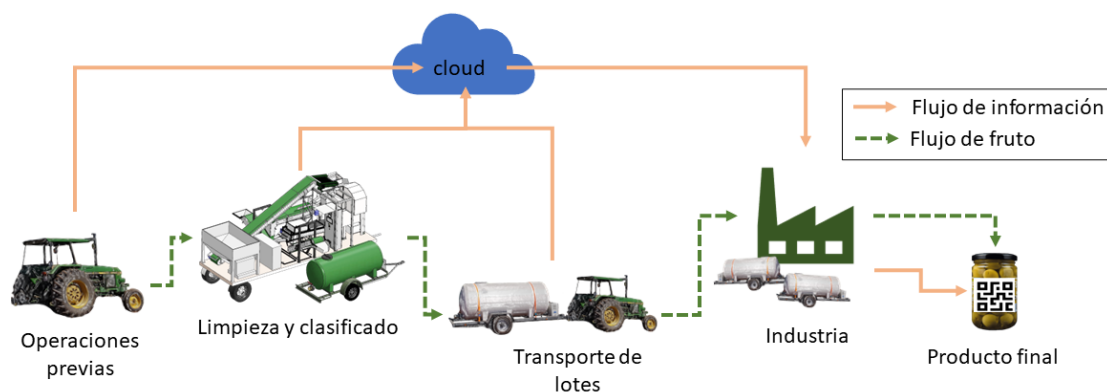


Figura 58. Metodología propuesta para el registro de la trazabilidad y calidad de los lotes de fruto

Para la evaluación de la metodología propuesta, así como de los prototipos desarrollados se han realizado dos tipos de ensayos. En primer lugar, se realizaron ensayos en laboratorio con aceitunas artificiales para evaluar exclusivamente el desempeño del algoritmo de clasificación en condiciones controladas. En segundo lugar, se llevaron a cabo ensayos en campo con fruto real con el objetivo de evaluar los prototipos en condiciones normales de trabajo. Por último, los datos de los lotes generados por el prototipo se registraron en la aplicación web para la trazabilidad y se unieron a la información registrada previamente respecto de las operaciones de campo, la meteorología y el transporte final de los lotes a la industria.

2.3.1 Pruebas de laboratorio

Para el ensayo en laboratorio se usaron aceitunas artificiales con características superficiales similares, en cuanto a peso, forma y color, a las aceitunas reales y fabricadas mediante inyección en un material polimérico. El comportamiento dinámico de estas aceitunas es muy diferente al de las aceitunas reales y se pueden generar numerosas proyecciones por rebotes, así como aleatoriedad en la clasificación mecánica por lo que se decidió sólo evaluar el algoritmo del sistema de clasificación. Gracias a la homogeneidad de los frutos las condiciones fueron controladas en cuanto a sus características (diámetros, áreas, pesos y colores en el espacio de color $L^*a^*b^*$). Las características de las aceitunas artificiales empleadas pueden verse en la Table 8.



Tabla 8. Características de las aceitunas artificiales

Nomenclatura	Peso unitario (g)	Área proyectada (mm ²)	Volumen (mm ³)	Diámetro mayor (mm)	Diámetro menor (mm)	L*	a*	b*	Color
A1G	5.1	362.68	4907.03	23.78	19.87	68.22	-50.73	53.13	
A1P	5.1	362.68	4907.03	23.78	19.87	36.95	4.92	-1.63	
A1B	5.1	362.68	4907.03	23.78	19.87	28.27	0.36	0.68	
A2G	3.33	278.17	3198.41	20.76	16.86	71.44	-45.81	59.36	
A3G	1.1	105.86	780.28	12.07	11.18	69.17	-46.41	58.26	

Para simular diferentes condiciones de índice de molestado de fruto (BI), las aceitunas artificiales A1G fueron rotuladas con un BI teórico (2% y 10%) mediante una plantilla sobre la

parte ecuatorial de los frutos. Posteriormente se realizó un muestreo de 125 frutos para comprobar el BI real frente al BI teórico de las plantillas (Tabla 9).

Tabla 9. Características del molestado realizado a las aceitunas artificiales

Nomenclatura	BI teórico (%)	BI medido (%)	Área mancha (sobre proyectada, mm ²)	Aspecto
A1G	2	1.75±0.33	7.2536	
A1G	10	11.66±3.1	36.268	

La evaluación en laboratorio para analizar el rendimiento del algoritmo de clasificación consistió en 3 ensayos diferentes con diferentes lotes de frutos artificiales que se pasaron por calles aleatorias de la máquina en 5 repeticiones por cada ensayo. De cada ensayo se extrajeron las imágenes adquiridas por el sistema y los parámetros de tamaño, madurez y BI calculados por el algoritmo, para contrastarlos con los conocidos.

- **Tamaño del fruto:** Se crearon diferentes lotes de aceitunas con 20 unidades cada uno para las aceitunas A1G, A2G y A3G. De cada repetición se extrajeron las imágenes captadas por las cámaras y se obtuvieron los parámetros de tamaño medidos.
- **Madurez del fruto:** Se crearon diferentes lotes de aceitunas con 20 unidades cada uno para aceitunas A1G, A1P y A1B que simulaban 3 índices de madurez diferentes según el Índice de Jaén, IM1 (aceituna verde), IM3 (aceituna marrón rojiza) y IM4 (aceituna negra) respectivamente. Previamente, para calibrar el sistema, se midió la media de los píxeles del canal verde de 50 frutos de tipo A1G y de 50 frutos de tipo A1B. Los valores de referencia obtenidos fueron 91 y 15 para las aceitunas A1G y A1B, respectivamente.
- **Molestado del fruto:** se creó un lote de 20 aceitunas A1G con un 10% de molestado y otro de 20 aceitunas A1G con un 2% de molestado. En la primera prueba, las aceitunas se colocaron con el molestado en dirección perpendicular a las cámaras del sistema de clasificación. En la segunda prueba, las aceitunas se colocaron al azar, sin orientar las manchas para observar la variabilidad estadística en función de la orientación del fruto.

2.3.2 Ensayos de campo

El prototipo fue transportado a una parcela de olivar de mesa intensivo de variedad ‘Manzanilla’ en Almodóvar del Río (Córdoba, España) (Figura 59). Se realizaron varios ensayos durante octubre de 2021 para evaluar el comportamiento de los sistemas desarrollados y la metodología propuesta. Sobre la máquina se vertieron diferentes partidas de fruto y el prototipo se puso en funcionamiento.



Figura 59. Prototipo en campo preparado para la realización de los ensayos

- Clasificación del fruto por tamaño: Para evaluar la clasificación en función del tamaño se recogieron 200 muestras de fruto en la cinta de salida de la perdigonera y se efectuó la medición de su diámetro mayor y menor mediante un calibre (Absolute CD 20 DCX, Mitutoyo, Japan). De igual forma se obtuvieron 200 muestras de fruto en la cinta de salida de calidad 'A' y se realizaron las mismas mediciones (diámetro mayor y menor) para comparar la eficacia de la perdigonera.

- Clasificación del fruto por madurez: se empleó la escala de madurez propuesta por (Ferreira, 1979) (Figura 60-abajo). Se realizaron 2 repeticiones con 50 kg de fruto en la entrada y se tomaron muestras en ambas cintas de salida ('A' y 'B') de un 10% del peso total en la misma. Para analizar el rendimiento del sistema de clasificación completo (sistema mecánico y algoritmo) se calcularon los porcentajes de fruto presentes de cada índice de madurez tanto en la entrada como en cada salida. Los frutos fueron evaluados uno a uno visualmente por un operario con experiencia en clasificación en base al índice de madurez y teniendo en cuenta la superficie total de cada fruto.

- Molestado de fruto generado por el prototipo: se empleó la categorización propuesta por (Jimenez-Jimenez et al., 2013b) (Figura 60-arriba). Se utilizaron frutos recolectados mediante ordeño y se descargaron sobre la tolva de recepción realizando el recorrido por el prototipo hasta la salida por la cinta de calidad 'A' para evaluar el molesto infringido al fruto por los diferentes elementos del prototipo. Se realizaron 2 repeticiones de 5 kg cada una y se tomaron muestras de fruto en diferentes puntos de control y fueron evaluados transcurridos 150 min para estabilizar la evolución del molesto (Jimenez-Jimenez et al., 2013b). Los puntos de control muestreados fueron la entrada y salida de la perdigonera (gm_in, gm_out), a la entrada y salida de la despalilladora (dest_in, dest_out) y a la salida por la cinta de calidad 'A' (A_out) previa a la inmersión en líquido. Debido al diseño del prototipo, en la entrada de la perdigonera se presupone ya en el fruto un impacto en la descarga previa en la tolva a una altura aproximada de 1.80 m (altura de descarga respecto al suelo de la tolva), aunque esta distancia se va decrementando a medida que se va descargando el fruto y los impactos posteriores son de fruto sobre fruto. A la salida de la perdigonera, el fruto sufre molesto por el contacto con los rodillos de la perdigonera. A la entrada de la despalilladora el fruto sufre el impacto con los rodillos de la despalilladora desde una altura de 0.75 m. Luego, a la salida de la despalilladora, se genera de nuevo molesto debido al contacto con los rodillos. En el tramo final, en la salida por la calidad 'A' el fruto se sufre molesto debido al movimiento por la cinta de clasificación y la caída a la cinta de salida 'A' a una altura de 0.25 m.

- Clasificación del fruto por molesto: se descargaron partidas reales de fruto recolectado mecánicamente mediante vibrador de troncos con vareo manual y sacudidor de ramas complementario. Después, el prototipo hizo un ciclo de trabajo con la limpieza y clasificación. Se realizaron 2 repeticiones con 50 kg de fruto en la entrada y se tomaron muestras de fruto en los diferentes puntos de control. La clasificación por categorías de molesto se realizó sólo con frutos completamente verdes (IM0 e IM1) debido a la dificultad de determinar visualmente el molesto en frutos con índices de madurez superiores, además de la mayoría estadística de estos frente a frutos con índice de madurez mayor. La superficie total del fruto fue evaluada y el mismo procedimiento fue realizado para las 2 calidades.

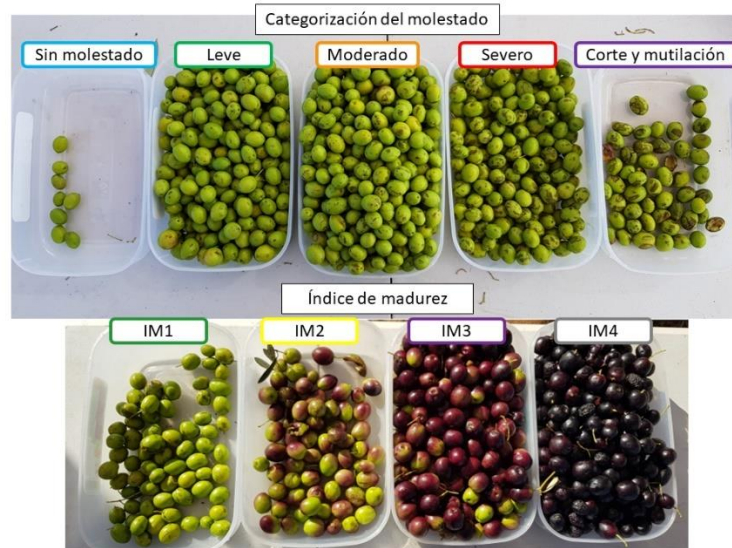


Figura 60. Índices y categorías de clasificación empleadas para el molesto (arriba) y madurez (abajo)

▪ **Parámetros de trabajo de la máquina:** La velocidad de procesamiento del prototipo en kg/h fue evaluada descargando partidas de fruto de aproximadamente 50 kg en la tolva de recepción y midiendo el tiempo que transcurría desde la apertura de la tolva hasta la finalización del lote completo por ambas cintas de salida. Para el sistema de limpieza se evaluó la materia orgánica saliente por la sopladora y despalladora y la saliente por las cintas de salida para obtener el grado de limpieza. La tecnología RFID para la identificación de los lotes fue evaluada mediante el porcentaje de acierto en la lectura del tag del remolque a la distancia de trabajo normal (2.50 m). Esta distancia es la distancia desde la antena a la parte trasera del remolque de transporte donde se sitúa el tag. Para evaluar el sistema de pesado de los lotes almacenados en el remolque TST, se pesaron mediante las básculas del remolque y se compararon los resultados con otra báscula de referencia (PCE-SW 1500N, PCE Instruments, Spain). Las pruebas de la sonda de temperatura del remolque TST se realizaron a una temperatura ambiente de 28°C con 1000 l de agua almacenada en el bidón a una temperatura de salida inicial de la red de 21.5°C y el tapón cerrado para verificar el aislante térmico.

▪ **Sistema de trazabilidad:** se introdujeron las operaciones habituales previas al procesado del fruto en el remolque TRCS mediante la aplicación desarrollada. Estas operaciones fueron la poda, los tratamientos fitosanitarios con los productos aplicados y su respectiva dosis, la fertilización con el producto y dosis usada y la recolección. La ruta seguida por el sistema de recolección fue registrada mediante un dispositivo móvil con la aplicación en ejecución y conexión con el GPS. Posteriormente, los datos de los lotes procesados en campo (ID, fecha, área, molesto, madurez, peso, origen y destino) fueron subidos a la base de datos de la aplicación. La ruta seguida por el remolque de transporte de lotes fue registrada de forma análoga a la del sistema recolección. La temperatura del líquido asociada a los lotes fue la obtenida en el ensayo de la sonda y el aislamiento. Los datos meteorológicos fueron obtenidos mediante conexión a la estación meteorológica más cercana a la parcela de recolección y asociados a los lotes. Toda la información relativa al ciclo de vida de los lotes se mostró en la aplicación a través de la pestaña 'Production cycle', puesta a disposición también de la industria mediante un usuario concreto.

3. Resultados

3.1 Pruebas de laboratorio

El ensayo en laboratorio con las aceitunas artificiales reportó buenos resultados en la evaluación del algoritmo (Figura 61). En el ensayo de tamaño se obtuvo un error relativo medio de $9.02 \pm 6.66\%$, $11.63 \pm 9.61\%$ y $10.31 \pm 8.85\%$ en la determinación del área del fruto para los tamaños A1, A2 y A3 respectivamente. La media del área del tamaño A1 se situó por encima de la línea de área real mientras que para el tamaño A2 y A3, la media estuvo por debajo de la línea de área real. Para el ensayo del índice de madurez mediante el nivel de madurez se obtuvieron $2.20 \pm 1.57\%$, $87.55 \pm 4.05\%$ y $101.06 \pm 3.26\%$ para las aceitunas artificiales de color verde, morado y negras, respectivamente, siendo la mayor desviación la obtenida en las aceitunas moradas. Los resultados del ensayo de molestado muestran que para las aceitunas A1 orientadas con la mancha hacia la cámara se obtuvo un porcentaje de molestado de $10.09 \pm 4.55\%$ y de $2.67 \pm 1.74\%$ para los porcentajes de molestado simulado de 10% y 2%, respectivamente. En el caso de las aceitunas dispuestas de forma aleatoria sobre la cinta de clasificación, se obtuvo un porcentaje de $1.54 \pm 3.26\%$ y de 0.34 ± 0.90 para los porcentajes de molestado simulado de 10% y 2%, respectivamente.

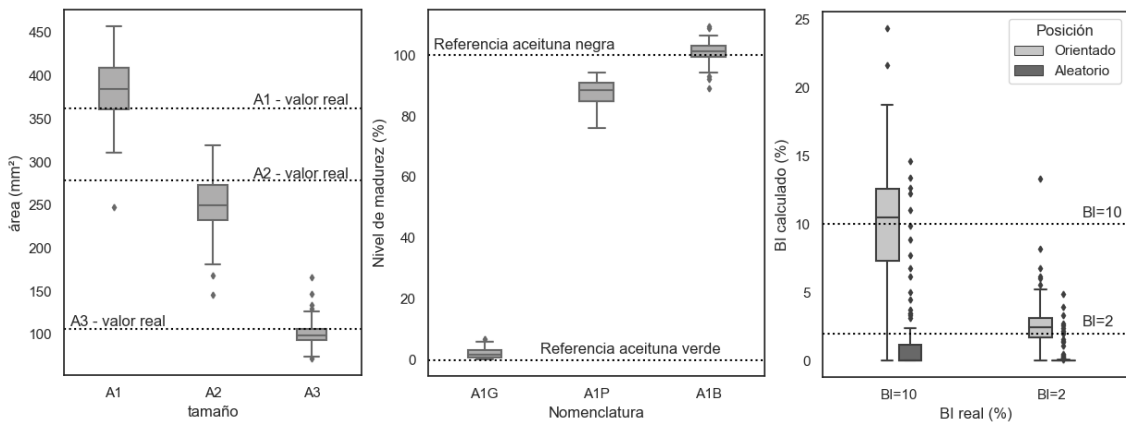


Figura 61. Resultados del ensayo en laboratorio para las diferentes áreas de aceitunas artificiales (izquierda), diferentes índices de madurez simulados (centro) y para diferentes índices de molestado y posicionamiento de las manchas del fruto

3.2 Ensayos en campo

Diferentes partidas de unos 500 kg de fruto cosechados fueron vertidas en la tolva de recepción de manera apropiada con un tractor con volteador de *big box* a la altura de 2.5 m del suelo. Seguidamente la tolva se abrió para dejar pasar la carga de aceitunas y ser enviada a la perdigonera mediante la cinta de elevación.

- **Clasificación del fruto por tamaño:** Las aceitunas de pequeño tamaño (perdigón) descartadas por la perdigonera tuvieron un diámetro mayor medio de 15.85 ± 1.99 mm y un diámetro menor medio de 12.08 ± 1.50 mm. Las aceitunas en la salida de calidad A tuvieron un diámetro mayor medio de 20.31 ± 1.86 mm y un diámetro menor medio de 16.30 ± 1.70 mm (Figura 62).

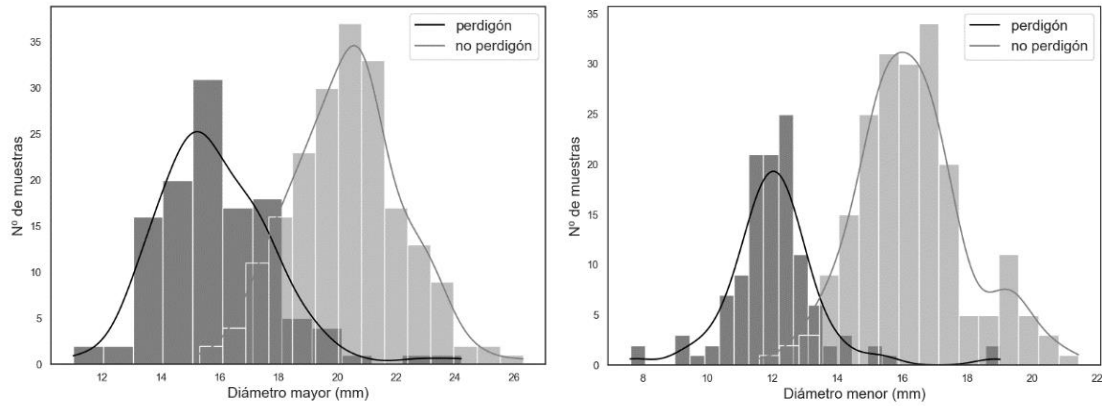


Figura 62. Histogramas de los diámetros mayor (arriba) y menor (abajo) de las aceitunas que salen por la perdigonera (negro) y por la cinta de salida de calidad 'A' (gris)

▪ **Clasificación del fruto por madurez:** El sistema de clasificación en función de la madurez del fruto reportó los siguientes resultados (Figura 63). Antes del procesamiento del fruto se obtuvo una distribución de $61.1 \pm 2.64\%$, $14.59 \pm 0.01\%$, $15.59 \pm 0.47\%$, $8.72 \pm 3.1\%$ para los índices de madurez IM1, IM2, IM3 y IM4, respectivamente. En la salida 'A', se obtuvieron unos porcentajes de acierto medios de $73.64 \pm 0.62\%$, $15.66 \pm 0.68\%$, $7.82 \pm 0.85\%$ y $2.89 \pm 0.44\%$ para los índices de madurez IM1, IM2, IM3 y IM4, respectivamente. Para la salida 'B', se obtuvieron $10.29 \pm 1.19\%$, $12.97 \pm 4.92\%$, $50.4 \pm 4.51\%$ y $26.34 \pm 0.77\%$ para los índices IM1, IM2, IM3 y IM4, respectivamente.

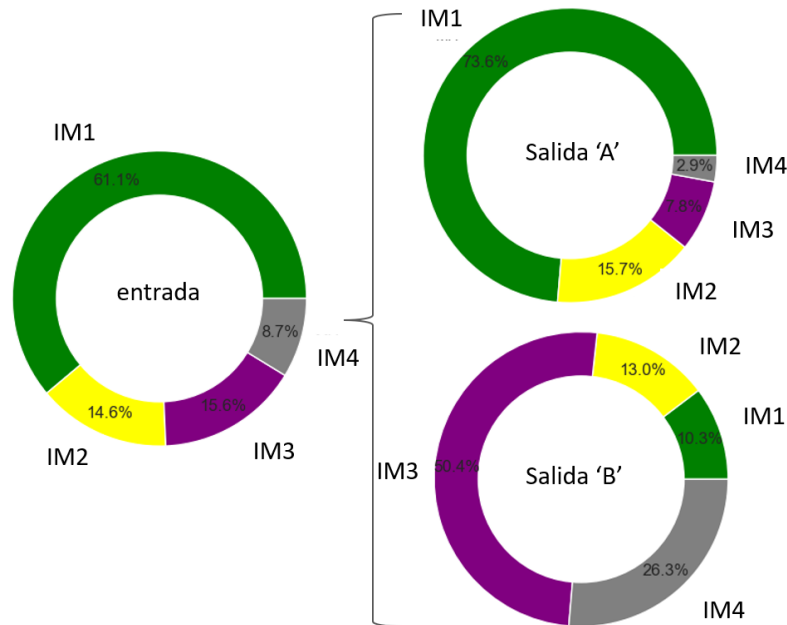


Figura 63. Resultados de clasificación en función del índice de madurez del fruto en la entrada (diagrama de sectores a la izquierda) para las salidas de calidad A y B (diagramas de sectores a la derecha)

▪ **Molestado del fruto generado por el prototipo:** La cantidad de daños ocasionados en el fruto a lo largo de las diferentes partes de la máquina se observa en la Figura 64. En el primer tramo evaluado correspondiente a la entrada a la perdigonera (gm_in) el molestado del fruto se divide en prácticamente molestado de categoría 'Sin molestado' o 'Leve'. Sólo se presentan en torno a un 1% con daño moderado. Posteriormente, tras el paso por la perdigonera (gm_out) el porcentaje de aceitunas 'Sin molestado' baja de aproximadamente el 55-10.8%, sube el porcentaje de aceitunas con molestado de categoría 'Leve' y levemente la categoría 'Moderado'. Tras el paso por la perdigonera y caída a la entrada de la

despalilladora (dest_in), el porcentaje de fruto con molestado de categoría ‘Sin molestado’ baja de nuevo hasta el 2.5% así como el fruto de categoría ‘Leve’. Sin embargo, hay un aumento considerable, en torno al 29% de fruto con categoría de molestado ‘Moderado’. También aparece un porcentaje bajo de aceitunas con categoría ‘Severo’ y, más aún con ‘Corte y mutilación’. A la salida de la despalilladora (dest_out) es donde se observa el mayor incremento de daño en cuanto a las categorías ‘Severo’ y ‘Corte y mutilación’ con un 13.8% y 3.3% respectivamente y la ausencia ya de fruto sin daño (‘Sin molestado’). Como consecuencia los frutos con categoría de molestado ‘Leve’ disminuyen considerablemente, en torno a un 26% y aumenta el porcentaje de fruto con categoría ‘Moderado’. Finalmente, en la cinta de salida A (A_out) es donde se produce el menor incremento de porcentaje de daño. Los puntos que infringen más daño en este tramo son la entrada a la cinta de clasificación y la caída a la cinta de salida ‘A’. El porcentaje de fruto con categoría ‘Leve’ con un descenso entorno a un 10%, es el porcentaje que aumentan entre el resto de las categorías con un aumento del 6.6%, 2.4% y 0.9% para las categorías ‘Moderado’, ‘Severo’ y ‘Corte y mutilación’, respectivamente.

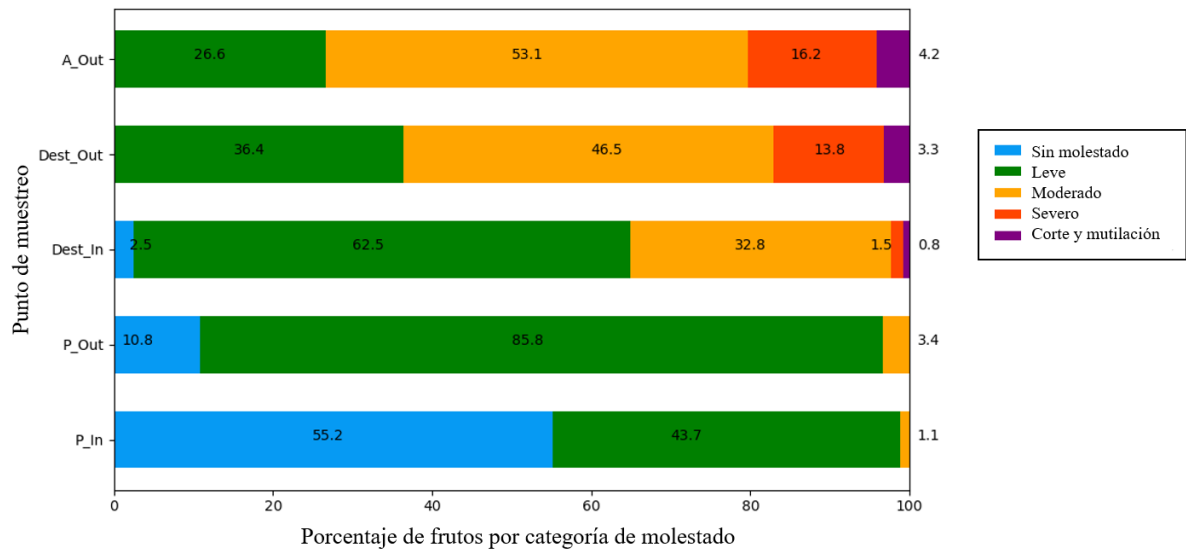


Figura 64. Molestado infringido por el prototipo en diferentes puntos de muestreo mediante aceituna recolectada a ordeño. gm_in y gm_out indican los puntos de muestreo a la entrada y salida de la perdigonera, respectivamente. dest_in y dest_out indican los puntos de muestreo a la entrada y salida de la despalilladora, respectivamente. A_out es el punto de muestreo en la cinta de salida de fruto de calidad ‘A’.

- **Clasificación del fruto por molestado:** En el ensayo de clasificación del molestado, se evaluó en primer lugar un lote de entrada de fruto obteniendo una distribución para las categorías de molestado de 46.8% para ‘Leve’, 29.1% para ‘Moderado’, 17.9% para ‘Severo’, 4% para ‘Corte y mutilación’ y 2.1% para ‘Sin molestado’. Realizada la clasificación y evaluados los lotes de fruto de la calidad ‘A’ y ‘B’ se observa una mayoría de fruto de categoría ‘Leve’ (46.1%) en la calidad ‘A’ frente a la ‘B’ y de ‘Severo’ (28.6%) en la calidad ‘B’ frente a la ‘A’. El resto de las categorías están más próximas entre sí, estando la categoría ‘Moderado’ con un 37.3% y 42.5% para la calidad ‘A’ y ‘B’, respectivamente y la categoría ‘Corte y mutilación’ con un 6.8% y 10.5% para la calidad ‘A’ y ‘B’, respectivamente. En ninguna de las dos calidades se observaron frutos perfectamente sanos sin ninguna mancha de molestado (Figura 65).

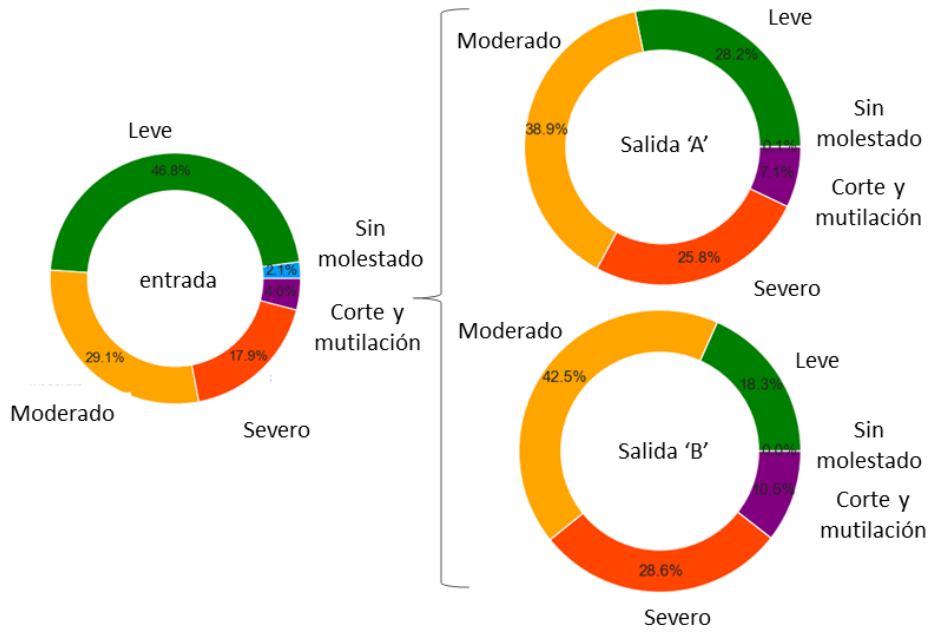


Figura 65. Resultados de clasificación en función del molestado del fruto en la entrada (diagrama de sectores a la izquierda) para las salidas de calidad A y B (diagramas de sectores a la derecha)

- Parámetros de trabajo de la máquina:** La cadencia medida durante los ensayos fue de 973.82 ± 101.59 kg/h. El sistema de limpieza permitió reducir la suciedad del lote de fruto entrante para su procesamiento posterior (Figura 66-izquierda). La sopladora del sistema de limpieza logró retirar la mayor parte de hojas y ramas pequeñas que pasan de la perdigonera ($95.1 \pm 3.2\%$). El sistema no fue capaz de retirar pequeños tallos unidas a frutos (individuales o múltiples) o ramas más grandes que por su peso no son desviadas por la corriente de aire. La despalladora logró retirar todas las ramas de gran tamaño, dejando sólo pasar algunas pequeñas debido a la separación de los rodillos y el tamaño de estas. Los lotes finales 'A' presentaron un grado de limpieza muy adecuado optimizando los transportes de los lotes de esta calidad y la operación de limpieza en industria (Figura 66-centro). El lote final 'B' presentó algunas hojas que cayeron a través de los rodillos de la perdigonera (Figura 66-derecha).



Figura 66. Entrada de fruto en la tolva (izquierda) y salida de calidad 'A' (centro) y 'B' (derecha)

El equipo RFID obtuvo un 100% de acierto en la identificación del remolque TST a la distancia especificada. El sistema de pesado conectado al PC del remolque permitió pesar los lotes para enviar su valor a la aplicación y se obtuvo un error absoluto medio de 3.25 ± 3.05 kg. La temperatura del agua estuvo en una media de $22.65 \pm 0.38^\circ\text{C}$. Inicialmente se observó un ligero incremento debido al contacto del agua con las paredes del bidón a diferente temperatura hasta alcanzar un equilibrio en torno a 22.7°C y manteniéndose estable durante aproximadamente 4 horas. Finalmente, en la Figura 67, se muestra un ejemplo del ciclo de producción registrado para un lote determinado.



Figura 67. Ejemplo de información registrada en la aplicación web para un lote

4. Discusión

Las dimensiones del prototipo desarrollado fueron adecuadas para su correcto funcionamiento y movilidad en campo. La superficie de apertura de la tolva que carga el fruto hacia la perdigonera fue limitada (900 cm²) y, en algunos casos, se producían atascos cuando el lote de fruto contenía un exceso de hojas y ramas. El sistema de limpieza funcionó bien para suministrar lotes de frutos limpios a la máquina clasificadora. Esto significa que este proceso no será necesario en las instalaciones de la industria. La perdigonera retiró casi todas las aceitunas de pequeño tamaño (98%). Los frutos de pequeño diámetro que salieron por la cinta de salida de calidad "A" se debieron a varias razones. El deslizamiento sobre otros frutos sin estar en contacto con los rodillos de la perdigonera y la posterior evaluación como calidad 'A' por parte del algoritmo o fallo mecánico en el sistema de clasificación. Por otro lado, los de mayor diámetro que entraron por la perdigonera (2%) se debieron al aplastamiento durante las operaciones de recolección o a una manipulación inadecuada del fruto hasta llegar al prototipo. La sopladora y la despalladora eliminaron la mayor parte de las hojas y ramas, 95.1±3.2% y 100%, respectivamente. La presencia de hojas y pequeñas ramas puede contribuir a perturbar el proceso de clasificación, tanto los datos del algoritmo como la clasificación mecánica, al alterar la dinámica o la trayectoria del fruto. Si la aceituna está adherida al tallo, puede limitar el flujo de aire con su deposición en las boquillas. La modificación de la posición de las boquillas podría resolver este problema. La instalación de la perdigonera después de la tolva de recepción provocaba una gran cantidad de hojas junto con las aceitunas de pequeño tamaño y, en consecuencia, por la salida de calidad 'B'. Cambiando el orden de los elementos de limpieza a sopladora-despalladora-perdigonera se conseguiría también una salida limpia de calidad 'B', optimizando así también el transporte de los lotes desechados a la almazara.

Hay muchos factores en el sistema de clasificación que afectan al rendimiento de la máquina. La aleatoriedad en la orientación de los frutos respecto a las cámaras puede afectar al algoritmo al no evaluar correctamente las dimensiones (González-Merino et al., 2022) en aquellos con el pedicelo o la parte opuesta perpendicular a la cámara o, también, para la evaluación del índice de madurez. Los colores de evolución de la madurez del fruto no se producen de forma homogénea en toda la superficie del fruto, por lo que algunos frutos pueden ser clasificados erróneamente con un índice de madurez evaluado diferente al real. El uso en diferentes variedades puede modificar el rendimiento del sistema si se utiliza la misma configuración, ya que puede

haber diferencias en su color (García and Yousfi, 2005; Roca and Mínguez-Mosquera, 2001) La distribución de los índices de madurez a la entrada (Bartolini et al., 2014; Peri, 2014) también determinará el porcentaje de éxito, ya que a mayor presencia de IM3 y IM4 frente al resto de índices, mayor será el trabajo requerido a las boquillas y, por tanto, mayor la probabilidad de fallo. El orden de los frutos y la separación entre ellos en los carriles de la cinta de clasificación es fundamental para el buen funcionamiento del sistema de clasificación. La coincidencia de dos o más frutos de diferente índice en el mismo hueco puede provocar fallos en la evaluación de los frutos y en la posterior clasificación. Incluso con dos frutos del mismo índice en el mismo hueco, el contacto entre el chorro de aire comprimido puede ser ineficaz y provocar una clasificación errónea enviando cada fruto a una salida diferente. En cualquier caso, una correcta limpieza de los frutos y una separación fruto a fruto en la cinta es esencial para una correcta evaluación y para evitar bloqueos en el sistema. Por último, la velocidad de la cinta y la presión del aire expulsado por las boquillas también influyen en la clasificación debido al comportamiento dinámico que pueden tener (Dumanay et al., 2016).

En las pruebas de laboratorio realizadas con aceitunas artificiales en condiciones controladas para evaluar el tamaño, la madurez y el molestado, se observaron desviaciones en las mediciones obtenidas debidas a varios factores. En el ensayo de tamaño, estas variaciones se debían al movimiento del fruto debido a la aceleración de la cinta transportadora que modificaba su posición respecto a la cámara. Esto provocaba la rotación del fruto y, en consecuencia, la superficie proyectada era menor a medida que se desplazaba a lo largo de su eje longitudinal. Por otro lado, en ocasiones el fruto permanecía adherido a los separadores de carril, provocando que el área proyectada aumentara ligeramente, como ocurrió para el área media en el tamaño A1 ($383.31 \pm 35.13 \text{ mm}^2$) respecto al área teórica (362.68 mm^2). En los tamaños A2 y A3, el área media fue inferior (249.45 ± 30.62 y $100.25 \pm 13.28 \text{ mm}^2$, respectivamente) al área teórica (278.17 y 105.86 mm^2 , respectivamente). En la prueba del índice de madurez se produjeron desviaciones debidas a la iluminación, la mezcla de colores o la suciedad. La iluminación provocó algunos reflejos en la superficie plástica del fruto que hicieron que aparecieran colores distintos de los característicos. Además, en el caso de las aceitunas IM3, el color final se obtuvo durante el proceso de fabricación mezclando diferentes colores, lo que hizo que cada fruto fuera ligeramente diferente. Las impurezas o la ligera suciedad derivada de la manipulación de las aceitunas provocaron que algunas de ellas presentaran zonas con colores diferentes. En la prueba de molestado, el algoritmo se evaluó utilizando aceitunas con las manchas orientadas hacia la cámara y aceitunas dispuestas aleatoriamente. En la prueba con las aceitunas orientadas y para ambas BI (2% y 10%), las desviaciones se debieron a varios factores. Por un lado, el movimiento del fruto respecto a su posición inicial debido a la aceleración de la cinta transportadora, que influye en la estimación de las dimensiones totales del fruto y, por tanto, en el porcentaje de molestado. Por otra parte, las variaciones del dibujo debidas a la técnica de impresión utilizada y a la reflexión especular de los rayos luminosos procedentes del sistema de iluminación. En el ensayo con las aceitunas dispuestas aleatoriamente para ambos BI (2% y 10%), se observó una elevada desviación debida a la orientación del fruto, que en muchas ocasiones no captó el molestado y, en otras, no fue captado en su totalidad debido a la no realización de una evaluación del fruto en 360° .

Durante la prueba de campo con aceitunas reales, en la entrada la suma de porcentajes de frutos IM3 y IM4 fue del 25% aproximadamente y para las aceitunas IM1 y IM2 del 61% y 15%, respectivamente. Con esta distribución de lotes de frutos, se obtuvo un porcentaje de acierto del 89.3%, considerando la clasificación de IM2 en la salida 'A' junto con IM1 como acierto del algoritmo. Asimismo, en el caso de la salida 'B', se obtuvo un porcentaje de acierto del 76.7% en

la clasificación considerando como correctos los frutos IM3 y IM4. En un fruto IM2 hay zonas verdes y de color marrón rojizo en menos del 50% del fruto, por lo que muchos frutos de este índice son considerados por las industrias como aptos para el procesado en mesa. Los frutos IM3 y IM4 se consideran de descarte y no son aptos para su procesado como aceituna de mesa, por lo que generalmente se destinan a la producción de aceite debido a su buen rendimiento y calidad (Guzmán et al., 2015). En la prueba de clasificación basada en el molestado, la mayor parte de los frutos se obtuvieron en la categoría 'Leve' y en menor medida en la categoría 'Moderado' en la calidad 'A' y, asimismo, en las categorías 'Moderado' y 'Severo' en la calidad 'B'. La categoría 'Moderado' (37.3% en la calidad 'A' y 42.5% en la calidad 'B') está presente en ambas calidades con un porcentaje cercano debido a la dificultad de la clasificación visual de estos frutos dentro de esta categoría en relación con las adyacentes. Por otro lado, la presencia de aceitunas en la calidad 'A' de la categoría 'Corte y Mutilación' (6.8%) se debe a que estos frutos suelen presentar este daño localizado en un lado. El porcentaje de éxito en la clasificación de las máquinas de evaluación de la calidad de los frutos sin utilizar la rotación de frutos está influenciado por las variables a medir y su localización en la superficie del fruto. Daños distribuidos homogéneamente por la superficie del fruto debido al propio proceso de generación de daños o a la evolución de los colores del fruto mejorarán el rendimiento del sistema de clasificación (Sola-Guirado et al., 2022).

La prueba para evaluar los puntos más perjudiciales de la máquina en cuanto a la generación de molestado puede servir para tomar medidas correctoras o paliativas en futuras mejoras del prototipo. Los principales daños se produjeron por impactos debidos a la caída del fruto en distintos puntos a diferentes alturas. El punto donde se registró un mayor incremento de daños fue a la salida de la despalladora debido a la compresión que sufrieron algunos frutos por la imprecisión en la alineación entre los rodillos, lo que provocó algunos cortes y mutilaciones. La corrección de este aspecto mejoró los daños generados en este punto. Para amortiguar el impacto que sufrió el fruto en la tolva y la caída a la cinta de salida 'A', se podrían instalar superficies acolchadas que reduzcan el impacto (Sola-Guirado et al., 2022). Los resultados se obtuvieron con aceitunas de la variedad 'Manzanilla', siendo las más susceptibles a los impactos mecánicos. La utilización con otras variedades típicas para aceituna de mesa como la 'Hojiblanca' probablemente reportaría mejores resultados en cuanto a generación de molestado (Jiménez-Jiménez et al., 2013a).

El uso de una solución de NaOH líquido refrigerada mejora la calidad al detener el avance molestado (Morales-Sillero et al., 2014). Mientras el lote es procesado y almacenado en el campo, las aceitunas ya procesadas conservan la calidad anterior y el lote llega a la industria con una calidad superior a la conseguida por los métodos de transporte tradicionales (Rejano Navarro et al., 2008). Sin embargo, conlleva la necesidad de pasar primero por la industria para llenar el líquido en el remolque TST y después trasladarlo al campo, con el consiguiente aumento del coste de la operación de transporte. El remolque TST con tecnología RFID, contribuye al enlace entre el campo y la industria y a interconectar el lote de fruto transportado con la información registrada en su trazabilidad previa. Si no se clasifican los lotes en el campo en función de su calidad, los lotes se separan en la industria y se pierde la trazabilidad lograda anteriormente. La capacidad del remolque TST es suficiente para que con 2 o 3 transportes se pueda completar el volumen de una cocedera estándar utilizada en la industria de aceituna de mesa (~5000 kg) sin necesidad de operar con los lotes para no alterar la trazabilidad. Cuantos más remolques se empleen para completar la capacidad de la cocedera, más complicado será seguir la trazabilidad del fruto. Como el remolque TST sólo contiene aceitunas de calidad, la cocedera sólo podría contener dos o tres lotes, por lo que el producto final sólo tendría la incertidumbre de dos o tres posibles localizaciones. Con el

modo actual empleado en el sector, todos los lotes se mezclan en la industria y se pierde la trazabilidad total del producto. Además, el remolque podría ampliarse a una mayor capacidad si se desea completar directamente una cocedera. Aunque la metodología propuesta implica un aumento de los costes en comparación con la gestión tradicional del fruto, la combinación de tratamientos postcosecha y recolección mecánica puede resultar rentable en comparación con la recolección manual del fruto (Zipori et al., 2021). Los trabajos futuros deberían ir en la dirección de aplicar la metodología y el prototipo en su conjunto durante al menos dos temporadas de cosecha.

La metodología propuesta mejora la eficiencia logística del transporte. Por un lado, la generación de lotes de cierta calidad en el campo mejora la eficiencia en el transporte de lotes, requiriendo menos lotes para transportar la misma cantidad de fruto de mesa apto en comparación con los métodos tradicionales. Durante la campaña, la madurez del fruto evoluciona, siendo habitual obtener al final de esta en torno a un 15% o 20% de fruto con un nivel de madurez avanzado, así como fruto con calibre no comercializable o de segunda categoría por defectos. Con la metodología y el prototipo propuestos, el fruto no comercializable se envía directamente a la almazara, evitando el transporte intermedio desde el procesador o entamadora hasta la almazara y ahorrando costes. Por otro lado, la industria de la aceituna de mesa sólo recibe fruto procesable con lotes de calidad y trazabilidad controladas o con cantidades muy pequeñas de fruto que no se puede procesar para consumo en fresco. Esto minimiza enormemente la carga de trabajo de la industria, aumentando la productividad de los procesos, ya que se pueden realizar más rápidamente al reducir el porcentaje de fruto a retirar. Esto es muy importante debido a que la temporada de recolección se concentra aproximadamente en un mes o mes y medio al año y estos procesos son intensivos en recursos, tanto en operarios como en maquinaria y energía. Por último, la aplicación web centraliza la información generada en la fase de campo y permite el acceso a la información tanto al agricultor como a la industria. Por un lado, la conexión de la industria a la aplicación web con acceso a la información de los lotes le permitiría conocer con antelación los lotes que se están generando en el campo para adaptar sus instalaciones de forma más eficiente. Además, la industria podría unir la trazabilidad de los lotes de campo a la generada en sus procesos internos. Por otro lado, el agricultor puede evaluar el rendimiento de la parcela y conocer la calidad del fruto que va a entregar a la industria para gestionar mejor los precios de venta. También puede planificar las operaciones y los recursos materiales y personales gestionando la explotación de forma más eficiente. Esto también facilita la incorporación del transporte posterior al punto de venta, con el objetivo de proporcionar al consumidor un historial de toda la cadena de producción. El uso de tecnologías como las etiquetas QR en los envases permitiría a los consumidores acceder a la información de forma sencilla y cómoda (Xueyuan and Bo, 2018).

Capítulo 7

Conclusiones

Conclusiones

Las conclusiones obtenidas en la presente Tesis Doctoral se exponen a continuación ordenadas en función de los Objetivos específicos desarrollados.

1. El **Objetivo específico 1**, Capítulo 3, corresponde al estudio de patrones de molestado de la aceituna de mesa causado por el uso de los medios de recolección e interceptación manuales y semi-mecanizados. Los resultados obtenidos han permitido establecer las siguientes conclusiones:
 - 1.1. Los patrones de molestado generados por los sistemas de recolección habituales estudiados (sacudidor de ramas, vibrador de ramas y vara) presentan diferencias notables, siendo el sacudidor de ramas el medio de recolección más agresivo y, por contra, el ordeño el que, de forma significativa, produce menos daños, de ahí la predilección por su uso. Por otro lado, el método de interceptación también influye en el daño generado al fruto, siendo significativamente mayor cuando la interceptación se hace sobre fardos frente a realizarla sobre una superficie acolchada. La combinación de recolección con sacudidor de ramas e interceptación sobre fardo es la que provoca los daños más severos al fruto.
 - 1.2. Los parámetros Circularidad, Diámetro máximo de Feret y Número de manchas se han mostrado como indicadores de molestado del fruto útiles para diferenciar los métodos de recolección e interceptación empleados. Por otro lado, se determina que la Firmeza del fruto en el área molestada es menor que en el resto del fruto y diferente si se opta por el método manual (ordeño) o por el resto de los métodos de recolección.
 - 1.3. El Color del fruto es un parámetro para diferenciar frutos sin daños o recolectados manualmente de otros recolectados mecánicamente o, también, diferentes niveles de daño en frutos con un estado de madurez poco avanzado, es decir, principalmente verdes. Esto es debido a que a medida que evoluciona la campaña de recolección el estado de madurez del fruto también avanza adquiriendo tonalidades más rojizas-oscuras, enmascarando el molestado que el fruto pueda tener.
 - 1.4. Los parámetros morfológicos Masa, Longitud, Diámetro y Circularidad presentan diferencias entre las variedades ‘Manzanilla de Sevilla’ y ‘Hojiblanca’. La variedad del fruto influye en la susceptibilidad al daño, tal como reportan otros estudios. Con independencia del método de recolección utilizado (sacudidor de ramas, vibrador de ramas o vara), la variedad ‘Manzanilla de Sevilla’ siempre sufre un mayor molestado que la ‘Hojiblanca’.
 - 1.5. Para cuantificar el molestado apreciado visualmente, se ha podido definir, como indicador, un Índice de molestado, determinándolo como el área molestada en relación con el área total del fruto, y se han establecido los límites para relacionarlo con las categorías de molestado ya establecidas en la bibliografía existente.
 - 1.6. En función del método de recolección empleado la localización de las manchas de molestado en la superficie del fruto (distribución superficial) es diferente. Empleando la vara o el sacudidor de ramas el daño es más localizado en una parte del fruto debido

al impacto directo con este. Por el contrario, mediante el vibrador de ramas, el molesto producido está distribuido por la superficie de una forma más homogénea, ya que el método de derribo es masivo, no localizado, aplicándose la vibración en el punto de agarre y transmitiéndose por toda la rama. Para facilitar la evaluación, se ha determinado un Factor medio de corrección del porcentaje de molesto, establecido en 1.4, que permite aproximar de un modo más realista el molesto evaluado con una sola fotografía al molesto real del fruto presente en toda su superficie.

2. El **Objetivo específico 2**, Capítulo 4, se ha orientado a desarrollar tecnologías para su empleo en el diseño de monitores de rendimiento que puedan adaptarse a maquinaria para la recolección mecanizada. Los resultados obtenidos han permitido establecer las siguientes conclusiones:

2.1. Se ha estudiado, principalmente, la aplicación de la tecnología ToF y la posibilidad de su implantación en maquinaria en condiciones de campo, consiguiéndose estimaciones adecuadas de la cosecha en tiempo real y la reducción de los problemas derivados del uso de otros métodos más habituales, como el pesaje directo mediante células de carga.

2.2. Al ser una tecnología óptica, la iluminación debe ser controlada de forma adecuada para que las mediciones no se vean afectadas. Esto es posible tomando acciones encaminadas a aislar los sensores de las fuentes de luz o seleccionando sensores que estén concebidos para trabajar en condiciones de iluminación exterior.

2.3. Otros factores afectan a la exactitud y precisión en la estimación de la cosecha: (1) Campo de visión de los sensores: debe ser acotado o adaptado a las dimensiones del sistema de almacenamiento, evitando así que la medición de las paredes de este influya en el peso estimado; (2) Colores: los oscuros merman la exactitud en las mediciones, aunque ligeramente; (3) Acabado de las superficies: las superficies brillantes o aquellas que generen reflejos de luz provocan desviación en las medidas realizadas; (4) Distancia de medida entre los sensores y el sistema de almacenamiento: debe ser tal que se eviten las zonas ciegas de los sensores y se optimice la zona de mayor exactitud de medida de estos; (5) Aceleraciones de la maquinaria: provocan aceleraciones horizontales y verticales del fruto transportado generando movimientos de la carga que afectan a la estimación del peso.

2.3. El peso de la cosecha almacenada se puede obtener mediante la medición del volumen ocupado por el fruto. A mayor número de mediciones para el cálculo del volumen mayor exactitud se podrá obtener en la estimación del peso. Este también es más aproximado empleando valores dinámicos respecto de la densidad del fruto que mediante valores estáticos. Adicionalmente, se puede aplicar un valor de *offset* para corregir el peso estimado mediante esta tecnología y aproximarse al valor de peso real debido a que los errores son sistemáticos.

2.4. El sistema de almacenamiento (tolva o similar) es un factor principal a tener en cuenta en la estimación del peso, ya que los sensores empleados y el algoritmo de cálculo deben ser adaptados a sus dimensiones. La zona de descarga de fruto en el sistema de almacenamiento afecta a la estimación del peso debido a que se generan diferentes

distribuciones del fruto y la exactitud de la medida dependerá de los sensores empleados y de una disposición adecuada de los mismos que permita captar dicha distribución. No obstante, el error obtenido, ya sea por subestimación o sobreestimación, es constante y puede corregirse aplicando un valor de *offset* para aproximarse al peso real.

3. El **Objetivo específico 3**, Capítulo 5, consiste en la definición de metodologías para el registro de la trazabilidad de la aceituna en todo el ciclo de producción. Los resultados obtenidos han permitido establecer las siguientes conclusiones:

- 3.1. La trazabilidad de las operaciones mecanizadas realizadas en el cultivo previas a la recolección (aplicación de fitosanitarios, poda, abonado, etc.) se puede registrar mediante la incorporación en el tractor de un dispositivo configurable, conectado a diferentes sensores, ubicados en las máquinas o aperos, que permita monitorizar dichas operaciones.

- 3.2. El uso de tecnologías de identificación y georreferenciación, como RFID y GPS, en combinación con las redes móviles y las aplicaciones *cloud*, han permitido configurar un sistema integral para identificar el origen de la producción y vincularlo a las operaciones realizadas a lo largo del ciclo del cultivo. Esto se puede hacer a nivel de parcela o dividiendo su superficie en diferentes sectores, según los criterios del agricultor, ganando en precisión en cuanto a la trazabilidad registrada.

- 3.3. La identificación de la zona o sector de la parcela donde se está trabajando y asociar a ésta los parámetros que se estén registrando, mediante la instalación de etiquetas RFID en campo, es factible siempre que los protocolos de recolección estén bien definidos, estableciéndose, con anterioridad a la realización de la operación, la ruta a seguir por parte de la maquinaria de recolección. Además, las etiquetas RFID permiten identificar partidas de fruto recolectadas en diferentes sistemas de almacenamiento (cajas, remolques, *big box*, etc.), su asociación a la parcela cosechada y la lectura de datos en la industria que recibe el fruto, mediante acceso a la información registrada en la aplicación *cloud*.

- 3.4. Por su parte, la tecnología GNSS, altamente desarrollada en la actualidad en la agricultura, sigue mejorándose e implementándose en nuevas aplicaciones de campo, siendo la trazabilidad un buen ejemplo, donde se puede utilizar para establecer las zonas límite entre sectores definidos en una parcela y asociar automáticamente, sin necesidad de una ruta preestablecida, los parámetros que se estén registrando en los sectores en los que se esté trabajando. En ambos casos, el sistema GPS requiere de una exactitud y precisión elevadas para no asociar la información a sectores contiguos o para evitar la pérdida de información.

- 3.5. En cuanto a las aplicaciones *cloud*, deben ser flexibles para adaptarse a los diferentes manejos que puede haber en las explotaciones olivareras, así como en las diferentes industrias de procesado (almazaras y entamadoras). La posibilidad de creación de operaciones, productos, sensores, maquinaria, etc. de forma personalizada supone una ventaja para su aceptación. En el sistema desarrollado, la asociación de un identificador a estos ítems creados permite configurar el dispositivo a bordo de la

maquinaria e incorporar la información a la trazabilidad de las partidas de fruto recolectadas en campo. El mismo proceso, con un dispositivo similar empleado en industria, garantiza una compatibilidad en la conexión entre la información de campo e industria siendo el lote recibido y su identificador asociado el nexos. En la última fase, de cara al consumidor, los códigos QR suponen un elemento de transmisión de información adecuado para su uso en los envases de los productos elaborados y para el acceso al histórico de producción a través de la aplicación *cloud*.

- 3.6. De forma general, se puede decir que el uso de la metodología, dispositivo y aplicación *cloud* propuestas benefician a todos los agentes implicados en la cadena: agricultor, industria y consumidor. El coste de implementación del sistema es bajo y aporta ventajas notables en cuanto al manejo de la explotación, de los lotes de productos y de los recursos utilizados. La información recibida por el consumidor es detallada en comparación con la trazabilidad actual.
4. El **Objetivo específico 4**, Capítulo 6, supone el análisis de la viabilidad de la aplicación de nuevas tecnologías y del conocimiento obtenidos en las anteriores investigaciones; a la realización de lotes de fruto en campo en base a su calidad y trazabilidad. Los resultados obtenidos han permitido establecer las siguientes conclusiones:
 - 4.1. Se ha establecido una metodología de trabajo en condiciones de campo adecuada para registrar la trazabilidad en todo el ciclo de producción y realizar lotes de fruto de una calidad determinada tras la cosecha, abordando también la logística, tanto en campo como hacia la industria. Todo el proceso requiere de dos prototipos, uno para limpieza y clasificación (TRCS) y otro para transporte del fruto (TST), ambos con interconexión a través de una aplicación *cloud*.
 - 4.2. En una primera etapa, en condiciones de laboratorio, se ha realizado la evaluación del sistema de clasificación, utilizando aceitunas artificiales construidas para tal fin, lo cual ha permitido la calibración y caracterización de su funcionamiento y la evaluación de los factores que influyen en la calidad de los frutos. En este sentido, la aleatoriedad en la orientación de las manchas de molesto respecto de las cámaras, la proximidad de los frutos a las paredes de los separadores de las diferentes líneas de clasificación, la aceleración de la cinta, el movimiento dinámico del fruto y las reflexiones por la fuente de iluminación y material de los frutos artificiales son factores que afectan a las medidas de las dimensiones de estos, de su grado de madurez y de su nivel de molesto.
 - 4.3. El prototipo TRCS ha conseguido obtener fruto limpio de hojas y ramas y clasificarlo en lotes de dos calidades diferentes configurables, apta y no apta, para procesamiento como aceituna de mesa. La clasificación, con evaluación parcial del fruto, realizada por el sistema de clasificación, analizando la madurez del fruto, ha obtenido buenos resultados para ambos lotes. Para la clasificación en base a la evaluación del molesto los resultados de ambos lotes han mostrado menos diferencias entre sí. Para la clasificación en base al tamaño, en una primera fase, realizada de forma mecánica y, en una segunda, por visión artificial, también se han conseguido muy buenos resultados. En cuanto a los principales factores que afectan al desempeño del sistema de clasificación, aparte de los mencionados en laboratorio, se señalan la

coincidencia de dos frutos en un mismo hueco de la cinta de clasificación, la unión al pedúnculo y/o hojas en algunos frutos y el fallo en el desvío por aire comprimido por existencia de dos frutos o frutos con pedúnculo y hojas.

- 4.4. El molestado infringido al fruto por la maquinaria se ha producido, fundamentalmente, en puntos donde existe una caída de este a distinto nivel o existe amontonamiento. Estos daños pueden reducirse con medidas paliativas como superficies acolchadas, tal como se concluyó en el Objetivo específico, 1 o elementos que permitan un flujo más fluido del fruto.
- 4.5. El prototipo TST ha permitido almacenar lotes de fruto de calidad apta en buenas condiciones gracias a la inmersión en una solución refrigerada de hidróxido de sodio (sosa cáustica) y al control de la temperatura del líquido. La georreferenciación del remolque ha permitido registrar los tiempos empleados y los recorridos realizados desde la industria a la parcela y viceversa e incorporarlos a la trazabilidad. La conexión campo-industria se ha realizado adecuadamente a través de la aplicación *cloud* y la etiqueta RFID incorporada en el remolque.
- 4.6. La aplicación *cloud*, siguiendo la metodología expuesta en el Objetivo específico 3, ha mostrado su aplicabilidad en campo permitiendo el registro de los parámetros de las operaciones previas a la recolección, de la recolección, de la gestión de la calidad del fruto y la realización de lotes en el prototipo y el transporte a la industria.
- 4.7. De forma general, se puede decir que es posible y necesario establecer un sistema de gestión de la calidad de la aceituna de mesa, que se inicie desde las propias operaciones de campo, en base a la generación de lotes de fruto que vayan incorporando toda la información de las diferentes etapas hasta llegar a la industria y de esta al consumidor final (trazabilidad). Con esto se consiguen beneficios patentes en cuanto a garantizar que la información obtenida no es parcial, pues se reflejan todas las operaciones de campo e industria, y se optimizan procesos como los de almacenamiento y transporte (logística), al poder gestionar el envío a las plantas industriales (entamadoras y almazaras) sólo del fruto de la calidad adecuada (clasificación en campo) y que sea demandada por el mercado y en la cantidad que pueden procesar en cada momento. No obstante, el sistema requiere de ajustes necesarios que no dependen de la técnica sino de la coordinación entre productores e industriales, como por ejemplo la adaptación de la capacidad de los medios de transporte a las cocederas empleadas en la industria de destino.

A la vista de las conclusiones extraídas en cada uno de los capítulos de esta Tesis Doctoral, se puede afirmar que el sector de la aceituna de mesa puede avanzar en la digitalización y mejora de sus procesos, especialmente en la fase de campo, donde, actualmente, se encuentra más atrasado, para incrementar la calidad de los productos obtenidos sin sacrificar la trazabilidad. Para ello, es necesario apostar por la introducción de las nuevas tecnologías, que serán las que proporcionen las bases para conseguirlo, así como, en algunos casos, por la adaptación de los métodos de cosecha y postcosecha seguidos hasta ahora.

Referencias

Referencias

- Abad, E., Palacio, F., Nuin, M., Zárate, A.G. de, Juarros, A., Gómez, J.M., Marco, S., 2009. RFID smart tag for traceability and cold chain monitoring of foods: Demonstration in an intercontinental fresh fish logistic chain. *J. Food Eng.* 93, 394–399. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.02.004>
- AEMO, 2020. Aproximación a los costes del cultivo del olivo. Desarrollo y conclusiones del estudio AEMO.
- Ahmed, M.R., Yasmin, J., Lee, W.-H., Mo, C., Cho, B.-K., 2017. Imaging Technologies for Nondestructive Measurement of Internal Properties of Agricultural Products: A Review. *J. Biosyst. Eng.* 42, 199–216.
- Aiello, G., Enea, M., Muriana, C., 2015. The expected value of the traceability information. *Eur. J. Oper. Res.* 244, 176–186. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.01.028>
- Alfaro, J.A., Rábade, L.A., 2009. Traceability as a strategic tool to improve inventory management: A case study in the food industry. *Int. J. Prod. Econ.* 118, 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.08.030>
- ASEMESA, 2023. Asociación Española de Exportadores e Industriales de Aceitunas de Mesa. Información general del sector - asemesa.es [WWW Document]. URL <https://asemesa.es/informacion-general-del-sector/> (accessed 5.7.23).
- Aspexit, 2020. Yield maps in Precision Agriculture - Aspexit [WWW Document]. URL <https://www.aspexit.com/yield-maps-in-precision-agriculture/> (accessed 5.6.23).
- Aung, M.M., Chang, Y.S., 2014. Traceability in a food supply chain: Safety and quality perspectives. *Food Control* 39, 172–184. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.11.007>
- Bartlett, A.C., Andales, A.A., Arabi, M., Bauder, T.A., 2015. A smartphone app to extend use of a cloud-based irrigation scheduling tool. *Comput. Electron. Agric.* 111, 127–130. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.12.021>
- Bartolini, S., Leccese, A., Andreini, L., 2014. Influence of canopy fruit location on morphological, histochemical and biochemical changes in two oil olive cultivars. *Plant Biosyst. - An Int. J. Deal. with all Asp. Plant Biol.* 148, 1221–1230. <https://doi.org/10.1080/11263504.2014.980360>
- Bayano-Tejero, S., Sola-Guirado, R.R., Gil-Ribes, J.A., Blanco-Roldán, G.L., 2019. Machine to machine connections for integral management of the olive production. *Comput. Electron. Agric.* 166, 104980. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104980>
- Belaj, A., Satovic, Z., Rallo, L., Trujillo, I., 2002. Genetic diversity and relationships in olive (*Olea europaea* L.) germplasm collections as determined by randomly amplified polymorphic DNA. *Theor. Appl. Genet.* 105, 638–644. <https://doi.org/10.1007/s00122-002-0981-6>
- Bernardi, B., Falcone, G., Stillitano, T., Benalia, S., Strano, A., Bacenetti, J., De Luca, A.I., 2018. Harvesting system sustainability in Mediterranean olive cultivation. *Sci. Total Environ.* 625, 1446–1458. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.005>
- Beyaz, A., Martínez Gila, D.M., Gómez Ortega, J., Gámez García, J., 2019. Olive fly sting detection based on computer vision. *Postharvest Biol. Technol.* 150, 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.01.003>
- Beyaz, A., Özkaya, M.T., İcen, D., 2017. Identification of some spanish olive cultivars using image processing techniques. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 225, 286–292. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.06.041>

- Biton, I., Namdar, D., Mani, Y., Ben-Ari, G., 2016. Table Olives: Toward Mechanical Harvesting, in: *Intech*. p. 13.
- Bo, Y., Wang, H., 2011. The application of cloud computing and the internet of things in agriculture and forestry. *Proc. - 2011 Int. Jt. Conf. Serv. Sci. IJCSS 2011* 168–172. <https://doi.org/10.1109/IJCSS.2011.40>
- Campus, M., Değirmencioglu, N., Comunian, R., 2018. Technologies and Trends to Improve Table Olive Quality and Safety. *Front. Microbiol.* 9, 169. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00617>
- Castillo-Ruiz, F.J., Tombesi, S., Farinelli, D., 2018. Olive fruit detachment force against pulling and torsional stress. *Spanish J. Agric. Res.* 16, e0202. <https://doi.org/10.5424/sjar/2018161-12269>
- Chang, Y.K., Zaman, Q., Farooque, A.A., Schumann, A.W., Percival, D.C., 2012. An automated yield monitoring system II for commercial wild blueberry double-head harvester. *Comput. Electron. Agric.* 81, 97–103. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.11.012>
- Channe, H., Kothari, S., Kadam, D., 2015. Multidisciplinary Model for Smart Agriculture using Internet - of - Things (IoT), Sensors , Cloud - Computing , Mobile - Computing & Big - Data Analysis. *Hemlata Channe al, Int.J.Computer Technol. Appl.* 6, 374–382.
- Chen, M.F., Huang, C.H., 2013. The impacts of the food traceability system and consumer involvement on consumers' purchase intentions toward fast foods. *Food Control* 33, 313–319. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.03.022>
- Choudhary, S.K., Jadoun, R.S., Mandoriya, H.L., 2016. Role of Cloud Computing Technology in Agriculture Fields. *Issn* 7, 2222–1719.
- Christiansen, M., Laursen, M., Jørgensen, R., Skovsen, S., Gislum, R., 2017. Designing and Testing a UAV Mapping System for Agricultural Field Surveying. *Sensors* 17, 2703. <https://doi.org/10.3390/s17122703>
- Chung, S.-O., Choi, M.-C., Lee, K.-H., Kim, Y.-J., Hong, S.-J., Li, M., 2016. Sensing Technologies for Grain Crop Yield Monitoring Systems: A Review. *J. Biosyst. Eng.* 41, 408–417. <https://doi.org/10.5307/JBE.2016.41.4.408>
- Corkidi, G., Balderas-Ruiz, K.A., Taboada, B., Serrano-Carreón, L., Galindo, E., 2006. Assessing mango anthracnose using a new three-dimensional image-analysis technique to quantify lesions on fruit. *Plant Pathol.* 55, 250–257. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2005.01321.x>
- Corrêdo, L. de P., Canata, T.F., Maldaner, L.F., de Lima, J. de J.A., Molin, J.P., 2021. Sugarcane Harvester for In-field Data Collection: State of the Art, Its Applicability and Future Perspectives. *Sugar Tech* 23, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00874-3>
- Costa, C., Antonucci, F., Pallottino, F., Aguzzi, J., Sarriá, D., Menesatti, P., 2013. A Review on Agri-food Supply Chain Traceability by Means of RFID Technology. *Food Bioprocess Technol.* 6, 353–366. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0958-7>
- Cubero, S., Aleixos, N., Albert, F., Torregrosa, A., Ortiz, C., García-Navarrete, O., Blasco, J., 2014. Optimised computer vision system for automatic pre-grading of citrus fruit in the field using a mobile platform. *Precis. Agric.* 15, 80–94. <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9324-7>
- Cunha, C.R., Peres, E., Morais, R., Oliveira, A.A., Matos, S.G., Fernandes, M.A., Ferreira, P.J.S.G., Reis, M.J.C.S., 2010. The use of mobile devices with multi-tag technologies for an overall contextualized vineyard management. *Comput. Electron. Agric.* 73, 154–164.

- <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.05.007>
- Dadi, V., Nikhil, S.R., Mor, R.S., Agarwal, T., Arora, S., 2021. Agri-Food 4.0 and Innovations: Revamping the Supply Chain Operations. *Prod. Eng. Arch.* 27, 75–89. <https://doi.org/10.30657/pea.2021.27.10>
- Dashpute, A., Anand, C., Sarkar, M., 2019. Depth Resolution Enhancement in Time-of-Flight Cameras Using Polarization State of the Reflected Light. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 68, 160–168. <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2838819>
- Diaz, R., 2016. Classification and Quality Evaluation of Table Olives, in: *Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation*. Elsevier, pp. 351–367. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802232-0.00014-1>
- Dumanay, A.B., Sakin, R., İstanbullu, A., 2016. A New Design of Olive Fruit Sorting Machine Using Color Image Processing. *Agric. Vet. Sci.* 9, 41–47. <https://doi.org/10.9790/2380-0911014147>
- ESYRCE, 2019. Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- 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 J. Agric. Res.* 12, 960. <https://doi.org/10.5424/sjar/2014124-5794>
- Fassakhova, G.R., Gataullina, R. V., Islamova, L.R., Chumarova, L.G., Mukhametzyanova, R.I., 2020. Problems of training qualified personnel for agriculture. *BIO Web Conf.* 17, 00091. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700091>
- Ferguson, L., Rosa, U.A., Castro-Garcia, S., Lee, S.M., Guinard, J.X., Burns, J., Krueger, W.H., O'Connell, N. V., Glozer, K., 2010. Mechanical harvesting of California table and oil olives. *Adv. Hortic. Sci.* 24, 53–63.
- Ferreira, J. (1979). Explotaciones olivereras colaboradoras, nº 5. Ministerio de Agricultura, Madrid. *erties of Cv. Nostrava di Brisighella Extra Virgin Olive Oil. J. Agric. Food Chem.* 52, 3649-3654.
- Fielke, S., Taylor, B., Jakku, E., 2020. Digitalisation of agricultural knowledge and advice networks: A state-of-the-art review. *Agric. Syst.* 180, 102763. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102763>
- Fountas, S., Carli, G., Sørensen, C.G., Tsiropoulos, Z., Cavalaris, C., Vatsanidou, A., Liakos, B., Canavari, M., Wiebenson, J., Tisserye, B., 2015. Farm management information systems: Current situation and future perspectives. *Comput. Electron. Agric.* 115, 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.011>
- Fróna, D., Szenderák, J., Harangi-Rákos, M., 2019. The Challenge of Feeding the World. *Sustainability* 11, 5816. <https://doi.org/10.3390/su11205816>
- Fu, L., Gao, F., Wu, J., Li, R., Karkee, M., Zhang, Q., 2020. Application of consumer RGB-D cameras for fruit detection and localization in field: A critical review. *Comput. Electron. Agric.* 177, 105687. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105687>
- Fuchs, S., Hirzinger, G., 2008. Extrinsic and depth calibration of ToF-cameras, in: *2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2008.4587828>
- Fursattel, P., Placht, S., Balda, M., Schaller, C., Hofmann, H., Maier, A., Riess, C., 2016. A Comparative Error Analysis of Current Time-of-Flight Sensors. *IEEE Trans. Comput. Imaging* 2, 27–41. <https://doi.org/10.1109/TCI.2015.2510506>

- García-Azcarate, T., 2022. Looking again at the Strategic Plans of the new Common Agrarian Policy (PEPAC) and its future Looking again at the Strategic Plans of the new Common Agrarian Policy (PEPAC) and to their future. *Rev. española Estud. agrosociales y Pesq.* 258, 3–17.
- García, J.M., Yousfi, K., 2005. Non-destructive and objective methods for the evaluation of the maturation level of olive fruit. *Eur. Food Res. Technol.* 221, 538–541. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-1180-x>
- Gené-Mola, J., Gregorio, E., Auat Cheein, F., Guevara, J., Llorens, J., Sanz-Cortiella, R., Escolà, A., Rosell-Polo, J.R., 2020. Fruit detection, yield prediction and canopy geometric characterization using LiDAR with forced air flow. *Comput. Electron. Agric.* 168, 105121. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105121>
- Gil-Ribes, J.A., Blanco-Roldán, G.L., Castro-García, S., Sola-Guirado, R.R., Colmenero-Martínez, J.T., Torres, S., Castillo-Ruiz, F., Bayano-Tejero, S., Ceular-Ortiz, D., 2017. Innovaciones en la recolección mecanizada de la aceituna de mesa [WWW Document]. *Innovagri*. URL <https://www.innovagri.es/investigacion-desarrollo-innovacion/innovaciones-en-la-recoleccion-mecanizada-de-aceituna-de-mesa.html> (accessed 5.6.23).
- Goldental-Cohen, S., Biton, I., Many, Y., Ben-Sason, S., Zemach, H., Avidan, B., Ben-Ari, G., 2019. Green Olive Browning Differ Between Cultivars. *Front. Plant Sci.* 10, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01260>
- Gongal, A., Amatya, S., Karkee, M., Zhang, Q., Lewis, K., 2015. Sensors and systems for fruit detection and localization: A review. *Comput. Electron. Agric.* 116, 8–19. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.021>
- González-Merino, R., Hidalgo-Fernández, R.E., Rodero, J., Sola-Guirado, R.R., Sánchez-López, E., 2022. Postharvest Geometric Characterization of Table Olive Bruising from 3D Digitalization. *Agronomy* 12, 2732. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112732>
- Guzmán, E., Baeten, V., Pierna, J.A.F., García-Mesa, J.A., 2015. Determination of the olive maturity index of intact fruits using image analysis. *J. Food Sci. Technol.* 52, 1462–1470. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1123-7>
- Guzmán, E., Baeten, V., Pierna, J.A.F., García-Mesa, J.A., 2013. Infrared machine vision system for the automatic detection of olive fruit quality. *Talanta* 116, 894–898. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.07.081>
- Hadi, S., Ahmad, D., Akande, F.B., 2009. Determination of the bruise indexes of oil palm fruits. *J. Food Eng.* 95, 322–326. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.05.010>
- Hamrita, T.K., Hoffacker, E.C., 2005. Development of a “smart” wireless soil monitoring sensor prototype using RFID technology. *Appl. Eng. Agric.* 21, 139–143. <https://doi.org/10.13031/2013.17904>
- Hansard, M., Lee, S., Choi, O., Horaud, R., 2013. Time-of-Flight Cameras, SpringerBriefs in Computer Science. Springer London, London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4658-2>
- He, Y., Liang, B., Zou, Y., He, J., Yang, J., 2017. Depth Errors Analysis and Correction for Time-of-Flight (ToF) Cameras. *Sensors* 17, 92. <https://doi.org/10.3390/s17010092>
- Hussein, Z., Fawole, O.A., Opara, U.L., 2020. Harvest and Postharvest Factors Affecting Bruise Damage of Fresh Fruits. *Hortic. Plant J.* 6, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2019.07.006>
- Ibañez Reche, J., Ibañez Reche, R., 2003. Máquina clasificadora de aceitunas. ES1052950U.
- Illade-Quinteiro, J., Brea, V., López, P., Cabello, D., Doménech-Asensi, G., 2015. Distance

- Measurement Error in Time-of-Flight Sensors Due to Shot Noise. *Sensors* 15, 4624–4642. <https://doi.org/10.3390/s150304624>
- IOOC, 2004. Trade standard applying to table olives. COI/OT/NC no. 1.
- Jadhav, U., Khot, L.R., Ehsani, R., Jagdale, V., Schueller, J.K., 2014. Volumetric mass flow sensor for citrus mechanical harvesting machines. *Comput. Electron. Agric.* 101, 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.12.007>
- Jiménez-Jiménez, F., Castro-García, S., Blanco-Roldán, G.L., Agüera-Vega, J., Gil-Ribes, J.A., 2012. Non-destructive determination of impact bruising on table olives using Vis-NIR spectroscopy. *Biosyst. Eng.* 113, 371–378. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.09.007>
- Jiménez-Jiménez, F., Castro-García, S., Blanco-Roldán, G.L., Ferguson, L., Rosa, U.A., Gil-Ribes, J.A., 2013a. Table olive cultivar susceptibility to impact bruising. *Postharvest Biol. Technol.* 86, 100–106. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.06.024>
- Jimenez-Jimenez, F., Castro-Garcia, S., Blanco-Roldan, G.L., González-Sánchez, E.J., Gil-Ribes, J.A., 2013b. Isolation of table olive damage causes and bruise time evolution during fruit detachment with trunk shaker. *Spanish J. Agric. Res.* 11, 65. <https://doi.org/10.5424/sjar/20131111-3399>
- Jiménez, M.R., Rallo, P., Rapoport, H.F., Suárez, M.P., 2016. Distribution and timing of cell damage associated with olive fruit bruising and its use in analyzing susceptibility. *Postharvest Biol. Technol.* 111, 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.07.029>
- Jongenelen, A.P.P., Bailey, D.G., Payne, A.D., Dorrington, A.A., Carnegie, D.A., 2011. Analysis of Errors in ToF Range Imaging With Dual-Frequency Modulation. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 60, 1861–1868. <https://doi.org/10.1109/TIM.2010.2089190>
- Jongenelen, A.P.P., Carnegie, D.A., Payne, A.D., Dorrington, A.A., 2010. Maximizing precision over extended unambiguous range for TOF range imaging systems, in: 2010 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference Proceedings. IEEE, pp. 1575–1580. <https://doi.org/10.1109/IMTC.2010.5488178>
- Jung, J., Lee, J.-Y., Jeong, Y., Kweon, I.S., 2015. Time-of-Flight Sensor Calibration for a Color and Depth Camera Pair. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 37, 1501–1513. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2014.2363827>
- Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura Pesca Agua y Desarrollo Rural, 2023. Aforos. Olivar: aceite y aceituna de mesa [WWW Document]. URL <https://www.juntadeandalucia.es/organismos/agriculturapescaaguaydesarrollorural/servicios/estadistica-cartografia/estadisticas-agricolas/paginas/aforos-estadisticas-agricolas.html> (accessed 5.6.23).
- Kitthawee, U., Pathaveerat, S., Srirungruang, T., Slaughter, D., 2011. Mechanical bruising of young coconut. *Biosyst. Eng.* 109, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.04.002>
- Kılıçkan, A., Güner, M., 2008. Physical properties and mechanical behavior of olive fruits (*Olea europaea* L.) under compression loading. *J. Food Eng.* 87, 222–228. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.11.028>
- Kopitke, P.M., Menzies, N.W., Wang, P., McKenna, B.A., Lombi, E., 2019. Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environ. Int.* 132, 105078. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>
- Lakovic, N., Brkic, M., Batinic, B., Bajic, J., Rajs, V., Kulundzic, N., 2019. Application of low-

- cost VL53L0X ToF sensor for robot environment detection, in: 2019 18th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH). IEEE, pp. 1–4.
<https://doi.org/10.1109/INFOTEH.2019.8717779>
- LAM, C.Y., IP, W.H., 2019. An Integrated Logistics Routing and Scheduling Network Model with RFID-GPS Data for Supply Chain Management. *Wirel. Pers. Commun.* 105, 803–817. <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06122-6>
- Li, Z., Liu, G., Liu, L., Lai, X., Xu, G., 2017. IoT-based tracking and tracing platform for prepackaged food supply chain. *Ind. Manag. Data Syst.* 117, 1906–1916.
<https://doi.org/10.1108/IMDS-11-2016-0489>
- Li, Z., Thomas, C., 2014. Quantitative evaluation of mechanical damage to fresh fruits. *Trends Food Sci. Technol.* 35, 138–150. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.12.001>
- Lindner, M., Schiller, I., Kolb, A., Koch, R., 2010. Time-of-Flight sensor calibration for accurate range sensing. *Comput. Vis. Image Underst.* 114, 1318–1328.
<https://doi.org/10.1016/j.cviu.2009.11.002>
- Longchamps, L., Panneton, B., Fountas, S., Khosla, R., 2019. Yield sensing technologies for horticultural crops: a short review, in: *Precision Agriculture '19*. Wageningen Academic Publishers, The Netherlands, pp. 589–595. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-888-9_73
- López-Riquelme, J.A., Pavón-Pulido, N., Navarro-Hellín, H., Soto-Valles, F., Torres-Sánchez, R., 2017. A software architecture based on FIWARE cloud for Precision Agriculture. *Agric. Water Manag.* 183, 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.020>
- Lu, Q., Xu, X., 2017. Adaptable Blockchain-Based Systems: A Case Study for Product Traceability. *IEEE Softw.* 34, 21–27. <https://doi.org/10.1109/MS.2017.4121227>
- Magalhães, P.S.G., Cerri, D.G.P., 2007. Yield Monitoring of Sugar Cane. *Biosyst. Eng.* 96, 1–6.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.10.002>
- Mairech, H., López-Bernal, Á., Moriondo, M., Dibari, C., Regni, L., Proietti, P., Villalobos, F.J., Testi, L., 2020. Is new olive farming sustainable? A spatial comparison of productive and environmental performances between traditional and new olive orchards with the model OliveCan. *Agric. Syst.* 181, 102816. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102816>
- Maja, J.M., Ehsani, R., 2010. Development of a yield monitoring system for citrus mechanical harvesting machines. *Precis. Agric.* 11, 475–487. <https://doi.org/10.1007/s11119-009-9141-1>
- Martínez Nieto, L., Hodaifa, G., Vives, S.R., Casares, J.A.G., Casanova, M.S., 2009. Photodegradation of phytosanitary molecules present in virgin olive oil. *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* 203, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2008.11.025>
- Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, 2023. Aceituna de mesa [WWW Document]. URL <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/producciones-agricolas/aceite-oliva-y-aceituna-mesa/aceituna.aspx> (accessed 5.6.23).
- Mon, T., ZarAung, N., 2020. Vision based volume estimation method for automatic mango grading system. *Biosyst. Eng.* 198, 338–349.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.08.021>
- Montaño, A., Zambrano, M., Lázaro-Madrea, A., Martínez, B., 2018. Monitorización del grado de maduración de la aceituna: nuevos parámetros para la variedad Arbequina - Aceite / Almazaras [WWW Document]. URL <https://www.interempresas.net/Produccion-Aceite/Articulos/209789-Monitorizacion-grado-maduracion-aceituna-parametros-variedad-Arbequina.html> (accessed 5.6.23).

- 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, 1028–1033. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.49.8.1028>
- Moscetti, R., Haff, R.P., Monarca, D., Cecchini, M., Massantini, R., 2016. Near-infrared spectroscopy for detection of hailstorm damage on olive fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 120, 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.06.011>
- Mutliscan Technologies, 2023. Multiscan Technologies en el sector de la aceituna [WWW Document]. URL <https://multiscan.eu/aplicacion-aceituna/> (accessed 5.6.23).
- Nasini, L., Proietti, P., 2014. Olive harvesting, in: *The Extra-Virgin Olive Oil Handbook*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, pp. 87–105. <https://doi.org/10.1002/9781118460412.ch8>
- New Holland, 2023. Olive Harvester: Braud 9090X | New Holland [WWW Document]. URL <https://agriculture.newholland.com/en-us/nar/products/grape-and-olive-harvesters/braud-9090x-olive-harvester> (accessed 5.6.23).
- Ning, Y., Zhong-qin, W., Malekian, R., Ru-chuan, W., Abdullah, A.H., 2013. Design of accurate vehicle location system using RFID. *Elektron. ir Elektrotechnika* 19, 105–110. <https://doi.org/10.5755/j01.eee.19.8.5405>
- Norma del CODEX para las aceitunas de mesa. CODEX STAN 66, 2013.
- Opara, U.L., Pathare, P.B., 2014. Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce—A review. *Postharvest Biol. Technol.* 91, 9–24. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.12.009>
- Paraforos, D.S., Vassiliadis, V., Kortenbruck, D., Stamkopoulos, K., Ziogas, V., Sapounas, A.A., Griepentrog, H.W., 2017. Multi-level automation of farm management information systems. *Comput. Electron. Agric.* 142, 504–514. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.11.022>
- Pérez-Ruiz, M., Agüera, J., Gil, J.A., Slaughter, D.C., 2011. Optimization of agrochemical application in olive groves based on positioning sensor. *Precis. Agric.* 12, 564–575. <https://doi.org/10.1007/s11119-010-9200-7>
- Perez-Ruiz, M., Slaughter, D.C., Gliever, C., Upadhyaya, S.K., 2012. Tractor-based Real-time Kinematic-Global Positioning System (RTK-GPS) guidance system for geospatial mapping of row crop transplant. *Biosyst. Eng.* 111, 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.10.009>
- Peri, C., 2014. *The Extra-Virgin Olive Oil Handbook*, The Extra-Virgin Olive Oil Handbook. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK. <https://doi.org/10.1002/9781118460412>
- Plasquy, E., Sola-Guiraldo, R.R., Florido, M. del C., García, J.M., Blanco-Roldán, G., 2019. Evaluation of a manual olive fruit harvester for small producers. *Res. Agric. Eng.* 65, 105–111. <https://doi.org/10.17221/18/2019-RAE>
- Ponce, J.M., Aquino, A., Millan, B., Andujar, J.M., 2019. Automatic Counting and Individual Size and Mass Estimation of Olive-Fruits Through Computer Vision Techniques. *IEEE Access* 7, 59451–59465. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2915169>
- Ponce, J.M., Aquino, A., Millán, B., Andújar, J.M., 2018. Olive-fruit mass and size estimation using image analysis and feature modeling. *Sensors (Switzerland)* 18. <https://doi.org/10.3390/s18092930>
- Price, R.R., Johnson, R.M., Viator, R.P., 2017. An Overhead Optical Yield Monitor for a

- Sugarcane Harvester Based on Two Optical Distance Sensors Mounted above the Loading Elevator. *Appl. Eng. Agric.* 33, 687–693. <https://doi.org/10.13031/aea.12191>
- Prinsloo, J., Malekian, R., 2016. Accurate vehicle location system using RFID, an internet of things approach. *Sensors (Switzerland)* 16. <https://doi.org/10.3390/s16060825>
- Privette, C. V., Khalilian, A., Torres, O., Katzberg, S., 2011. Utilizing space-based GPS technology to determine hydrological properties of soils. *Remote Sens. Environ.* 115, 3582–3586. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.019>
- Puerto, D., Gila, D., García, J., Ortega, J., 2015. Sorting Olive Batches for the Milling Process Using Image Processing. *Sensors* 15, 15738–15754. <https://doi.org/10.3390/s150715738>
- Qian, J., Ruiz-Garcia, L., Fan, B., Robla Villalba, J.I., McCarthy, U., Zhang, B., Yu, Q., Wu, W., 2020. Food traceability system from governmental, corporate, and consumer perspectives in the European Union and China: A comparative review. *Trends Food Sci. Technol.* 99, 402–412. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.025>
- Qian, J.P., Yang, X.T., Wu, X.M., Zhao, L., Fan, B.L., Xing, B., 2012. A traceability system incorporating 2D barcode and RFID technology for wheat flour mills. *Comput. Electron. Agric.* 89, 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.08.004>
- R. Sola-Guirado, R., Castro-Garcia, S., L. Blanco-Roldan, G., A. Gil-Ribes, J., J. Gonzalez-Sanchez, E., 2020. Performance evaluation of lateral canopy shakers with catch frame for continuous harvesting of oranges for juice industry. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 13, 88–93. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201303.4998>
- Ravetti, L., Robb, S., 2010. Continuous mechanical harvesting in modern Australian olive growing systems. *Adv. Hortic. Sci.* 24, 71–77.
- Ravetti, L.M., 2014. Technology for improving the efficiency of mechanical harvesting in modern olive growing. *Acta Hort.* 1057, 221–229. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1057.26>
- Real Decreto 1311/2012, 2012. Real Decreto 1311/2012, de 14 de septiembre, por el que se establece el marco de actuación para conseguir un uso sostenible de los productos fitosanitarios., *Boletín Oficial del Estado*. <https://doi.org/BOE-A-2012-5403>
- Real Decreto 679/2016, 2016. Royal Decree 679/2016, of December 16, which establishes the quality standard for table olives., *B.O.E.*
- Reese, D., Lefcourt, A.M., Kim, M.S., Martin Lo, Y., 2009. Using parabolic mirrors for complete imaging of apple surfaces. *Bioresour. Technol.* 100, 4499–4506. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.059>
- Reglamento CE 178/2002, 2008. Reglamento (CE) 178/2002 por el que se establecen los principios y los requisitos generales de la legislación alimentaria, se crea la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria y se fijan procedimientos relativos a la seguridad alimentaria.
- Rejano, L., Montañó, A., Casado, F.J., Sánchez, A.H., de Castro, A., 2010. Table Olives: Varieties and Variations, in: *Olives and Olive Oil in Health and Disease Prevention*. Elsevier, pp. 5–15. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374420-3.00001-2>
- Rejano Navarro, L., Sánchez-Gómez, A.H., Vega Macías, V., 2008. Nuevas tendencias en el tratamiento alcalino “cocido” de las aceitunas verdes aderezadas al estilo español o sevillano. *Grasas y Aceites* 59, 197–204. <https://doi.org/10.3989/gya.2008.v59.i3.509>
- Resende-Filho, M.A., Hurley, T.M., 2012. Information asymmetry and traceability incentives for food safety. *Int. J. Prod. Econ.* 139, 596–603.

- <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.05.034>
- Riquelme, M.T., Barreiro, P., Ruiz-Altisent, M., Valero, C., 2008. Olive classification according to external damage using image analysis. *J. Food Eng.* 87, 371–379. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.12.018>
- Roca, M., Mínguez-Mosquera, M.I., 2001. Changes in Chloroplast Pigments of Olive Varieties during Fruit Ripening. *J. Agric. Food Chem.* 49, 832–839. <https://doi.org/10.1021/jf0010001>
- Roy, P., Kislay, A., Plonski, P.A., Luby, J., Isler, V., 2019. Vision-based preharvest yield mapping for apple orchards. *Comput. Electron. Agric.* 164, 104897. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104897>
- Rufino Valor, J.R., 2000. Máquina para la selección de aceitunas. ES2149705A1.
- Ruiz-Garcia, L., Lunadei, L., 2011. The role of RFID in agriculture: Applications, limitations and challenges. *Comput. Electron. Agric.* 79, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.08.010>
- Ruiz-Garcia, L., Steinberger, G., Rothmund, M., 2010. A model and prototype implementation for tracking and tracing agricultural batch products along the food chain. *Food Control* 21, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2008.12.003>
- Saiz-Rubio, V., Rovira-Más, F., 2020. From Smart Farming towards Agriculture 5.0: A Review on Crop Data Management. *Agronomy* 10, 207. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020207>
- Sánchez-Gómez, A.H., García-García, P., Garrido Fernández, A., 2013. Spanish-style green table olive shelf-life. *Int. J. Food Sci. Technol.* 48, 1559–1568. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12124>
- Sánchez Gómez, A.H., García García, P., Rejano Navarro, L., 2006. Elaboration of table olives. *Grasas y Aceites* 57, 86–94.
- Saracoglu, T., Ucer, N., Ozarslan, C., 2011. Engineering properties and susceptibility to bruising damage of table olive (*Olea europaea*) fruit. *Int. J. Agric. Biol.* 13, 801–805.
- Satorres Martínez, S., Martínez Gila, D., Beyaz, A., Gómez Ortega, J., Gámez García, J., 2018. A computer vision approach based on endocarp features for the identification of olive cultivars. *Comput. Electron. Agric.* 154, 341–346. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.017>
- Segovia-Bravo, K.A., García-García, P., López-López, A., Garrido-Fernández, A., 2012. Effect of Inert Atmosphere on the Postharvest Browning of Manzanilla Olives and Optimization by Response Surface Methodology of the Aqueous Treatments. *J. Food Sci.* 77, S194–S201. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02666.x>
- Segovia-Bravo, K.A., García-García, P., López-López, A., Garrido-Fernández, A., 2011. Effect of Bruising on Respiration, Superficial Color, and Phenolic Changes in Fresh Manzanilla Olives (*Olea europaea pomiformis*): Development of Treatments To Mitigate Browning. *J. Agric. Food Chem.* 59, 5456–5464. <https://doi.org/10.1021/jf200219u>
- Shafi, U., Mumtaz, R., García-Nieto, J., Hassan, S.A., Zaidi, S.A.R., Iqbal, N., 2019. Precision Agriculture Techniques and Practices: From Considerations to Applications. *Sensors* 19, 3796. <https://doi.org/10.3390/s19173796>
- Simon Hendrik, E., Van Olmen, S., Soler Esteban, A., 2022. Product inspection and characterization device. US11249030B2.
- 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. *Biosyst. Eng.* 184, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.06.009>
- Sola-Guirado, R.R., Bayano-Tejero, S., Aragón-Rodríguez, F., Bernardi, B., Benalia, S., Castro-García, S., 2020a. A smart system for the automatic evaluation of green olives visual quality in the field. *Comput. Electron. Agric.* 179, 105858. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105858>
- Sola-Guirado, R.R., Bayano-Tejero, S., Aragon-Rodriguez, F., Peña, A., Blanco-Roldan, G., 2022. Bruising pattern of table olives ('Manzanilla' and 'Hojiblanca' cultivars) caused by hand-held machine harvesting methods. *Biosyst. Eng.* 215, 188–202. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01.010>
- Sola-Guirado, R.R., Castillo-Ruiz, F.J., Blanco-Roldan, G.L., Gonzalez-Sanchez, E., Castro-García, S., 2020b. Mechanical canopy and trunk shaking for the harvesting mechanization of table olive orchards. *Rev. la Fac. Ciencias Agrar.* 52, 124–139.
- 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. *Biosyst. Eng.* 118, 186–193. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.12.007>
- Soler Esteban, A., Van Olmen, S., 2014. Machine for the inspection and sorting of fruits and inspection and sorting method used by said machine. US008816235B2.
- Stella, E., Moschetti, R., Haff, R.P., Monarca, D., Cecchini, M., Contini, M., Massantini, R., 2015. Review: Recent Advances in the Use of Non-Destructive near Infrared Spectroscopy for Intact Olive Fruits. *J. Near Infrared Spectrosc.* 23, 197–208. <https://doi.org/10.1255/jnirs.1169>
- Suprem, A., Mahalik, N., Kim, K., 2013. Computer Standards & Interfaces A review on application of technology systems , standards and interfaces for agriculture and food sector. *Comput. Stand. Interfaces* 35, 355–364. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2012.09.002>
- Suresh, P., Daniel, J.V., Parthasarathy, V., Aswathy, R.H., 2014. A state of the art review on the Internet of Things (IoT) history, technology and fields of deployment. 2014 Int. Conf. Sci. Eng. Manag. Res. ICSEMR 2014 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICSEMR.2014.7043637>
- Tan, L., Haley, R., Wortman, R., 2015. Cloud-based harvest management system for specialty crops. *Proc. - IEEE 4th Symp. Netw. Cloud Comput. Appl. NCCA 2015* 122, 91–98. <https://doi.org/10.1109/NCCA.2015.23>
- Tarjan, L., Šenk, I., Tegeltija, S., Stankovski, S., Ostojic, G., 2014. A readability analysis for QR code application in a traceability system. *Comput. Electron. Agric.* 109, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.08.015>
- Taylor, J. a, 2004. Digital Terroirs and Precision Viticulture: Investigations into the application of information technology in Australian vineyards.
- Taylor, J.A., Sanchez, L., Sams, B., Haggerty, L., Jakubowski, R., Djafour, S., Bates, T.R., 2016. Evaluation of a commercial grape yield monitor for use mid-season and at-harvest. *OENO One* 50, 57–63. <https://doi.org/10.20870/oenone.2016.50.2.784>
- Tian, F., 2017. A supply chain traceability system for food safety based on HACCP, blockchain & Internet of things, in: 2017 International Conference on Service Systems and Service Management. IEEE, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICSSSM.2017.7996119>
- Tobias, M., Holger, K., Jochen, F., Martin, A., Robert, L., 2005. Robust 3D Measurement with PMD Sensors. *Range Imaging Day, Zürich* 7, 8.

- Valencia-garcía, R., Alcaraz-mármol, G., Cioppo-morstadt, J. Del, Vera-lucio, N., Eds, M.B., 2018. *Technologies and Innovation*.
- Van Zeebroeck, M., Van linden, V., Ramon, H., De Baerdemaeker, J., Nicolai, B.M., Tijskens, E., 2007. Impact damage of apples during transport and handling. *Postharvest Biol. Technol.* 45, 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.01.015>
- Vasconez, J.P., Kantor, G.A., Auat Cheein, F.A., 2019. Human–robot interaction in agriculture: A survey and current challenges. *Biosyst. Eng.* 179, 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.12.005>
- Xueyuan, W., Bo, Y., 2018. Research and Design of Traceability System of Agricultural Products, in: 2018 International Conference on Engineering Simulation and Intelligent Control (ESAIC). IEEE, pp. 384–388. <https://doi.org/10.1109/ESAIC.2018.00097>
- Xul, Q., Zou, X., Zhao, J., 2009. On-Line Detection of Defects on Fruit by Machinevision Systems Based on Three-Color-Cameras Systems, in: IFIP Advances in Information and Communication Technology. pp. 2231–2238. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0213-9_75
- Yang, F., Wang, K., Han, Y., Qiao, Z., 2018. A Cloud-Based Digital Farm Management System for Vegetable Production Process Management and Quality Traceability. *Sustainability* 10, 4007. <https://doi.org/10.3390/su10114007>
- Ye, Y., Wang, Z., Jones, D., He, L., Taylor, M., Hollinger, G., Zhang, Q., 2017. Bin-Dog: A Robotic Platform for Bin Management in Orchards. *Robotics* 6, 12. <https://doi.org/10.3390/robotics6020012>
- Zagórda, M., Walczykova, M., 2018. The application of various software programs for mapping yields in precision agriculture. *BIO Web Conf.* 10, 01018. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20181001018>
- Zhang, C., Bai, J., Wahl, T.I., 2012. Consumers' willingness to pay for traceable pork, milk, and cooking oil in Nanjing, China. *Food Control* 27, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.03.001>
- Zheng, J., Wang, Y., Nihan, N.L., 2005. Quantitative evaluation of GPS performance under forest canopies. 2005 IEEE Networking, Sens. Control. ICNSC2005 - Proc. 2005, 777–782. <https://doi.org/10.1109/ICNSC.2005.1461289>
- Zipori, I., Dag, A., Tugendhaft, Y., Birger, R., 2014. Mechanical Harvesting of Table Olives: Harvest Efficiency and Fruit Quality. *HortScience* 49, 55–58. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.49.1.55>
- Zipori, I., Fishman, A., Zelas, Z.B.-B., Subbotin, Y., Dag, A., 2021. Effect of postharvest treatments of mechanically harvested “Manzanilla” table olives on product quality. *Postharvest Biol. Technol.* 174, 111462. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111462>

Anexos

Anexo I

**Bruising pattern of table olives
('Manzanilla' and 'Hojiblanca' cultivars)
caused by hand-held machine
harvesting methods**



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

journal homepage: www.elsevier.com/locate/issn/15375110



Research Paper

Bruising pattern of table olives ('Manzanilla' and 'Hojiblanca' cultivars) caused by hand-held machine harvesting methods



Rafael R. Sola-Guirado ^{a,*}, Sergio Bayano-Tejero ^b,
Fernando Aragon-Rodriguez ^b, Araceli Peña ^c, Gregorio Blanco-Roldan ^b

^a Department of Mechanics, University of Cordoba, Campus de Rabanales, Cordoba, Spain

^b Department of Rural Engineering, University of Cordoba, Campus de Rabanales, Cordoba, Spain

^c Research Centre CIAIMBITAL, University of Almería, Almería, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 May 2021

Received in revised form

7 January 2022

Accepted 12 January 2022

Published online 28 January 2022

Keywords:

Bruise index

Colour

Damage

Fruit characterisation

Mechanical harvesting

Olea europaea

This work presents a characterisation of the fruit and the bruising caused by some common detachment methods (manual, stick, shaker comb, branch shaker) and interception methods (net or padding) in common table olive varieties. We took pictures of fruit samples inside a special device, and the images were processed to extract characteristic parameters of shape and size (number of spots, Feret diameter, circularity, colours ...). Moreover, we studied the time evolution of bruising caused on the fruit by a controlled impact. Finally, we developed a system that allows synchronised rotation of the fruit with image capture to evaluate bruising on the whole volume of the fruit. Our results showed that different harvesting treatments produced differences in the average number and diameter of spots per fruit, as well as in the average area of the spots per fruit for the different varieties. Fruit colour or bruising can also serve as a control factor for computer vision characterisation, for which reason we recorded differences in the firmness of the bruised and non-bruised areas of fruit. The harvesting method that caused the highest median values of bruise index was the shaker comb, particularly for 'Manzanilla' with an index of 1.59% on padding compared to 0.24% for 'Hojiblanca'. Net interception was also observed to increase the bruise index in 'Manzanilla' (5.85%). Bruising assessment that only considers a single photograph means that a considerable amount of bruising remains disregarded compared to the actual bruising on the whole volume of the fruit.

© 2022 The Author(s). Published by Elsevier Ltd on behalf of IAGrE. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

* Corresponding author.

E-mail address: ir2sogur@uco.es (R.R. Sola-Guirado).

<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01.010>

1537-5110/© 2022 The Author(s). Published by Elsevier Ltd on behalf of IAGrE. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introduction

The cultivation of the olive tree (*Olea europaea* L.) enjoys sustained growth at a global level, currently reaching 10.5 Mha (FAO, 2019). Slightly less than half of the total production, 2.9 million tonnes, is destined for table olives. Spain plays a major role in the table olive sector, with a production of 0.5 million tonnes (IOC., 2020). The 'Manzanilla', 'Gordal' and 'Hojiblanca' cultivars (Campus, Degirmencioglu, & Comunian, 2018) are the most common commercial varieties due to their good pulp/pit ratio, and green processing is one of the most common methods employed for table olives. The Spanish style, which predominates in this method (Sánchez-Gómez, García-García, & Garrido-Fernández, 2013; Royal Decree 679/2016), means that any fruit defects require special attention as they influence quality and, therefore, the price fruit can attain on the market. Any spots on the fruit's surface will determine its category for commercialisation (Royal Decree 679/2016/Royal Decree 679/2016). Such defects can be classified according to their origin (Riquelme, Barreiro, Ruiz-Altisent, & Valero, 2008), and bruising constitutes the characteristic type of damage produced during harvesting.

Mechanical harvesting considerably increases the level of damage to fresh fruit such as table olives (Hussein, Fawole, & Opara, 2020). The main objective of the manual harvesting conducted in most table olive orchards is to reduce damage to the fruit. This causes a considerable loss of profitability since manual harvesting methods compete with the highly mechanised systems employed in modern olive growing for the new intensified planting systems. Advances in this field are oriented towards comprehensive mechanisation using combined harvesting machinery (Ferguson et al., 2010; Sola-Guirado, Castillo-Ruiz, Blanco-Roldán, Gonzalez-Sanchez, & Castro-García, 2020) and post-harvest systems (Rejano, Montaña, Casado, Sánchez, & De Castro, 2010; Zipori, Fishman, Zelas, Subbotin, & Dag, 2021). In many farming contexts, mechanisation is not a valid solution due to the existing orography, the small size of the farm or a lack of resources, all of which make the introduction of machinery difficult. The only alternative on these farms is harvesting with semi-mechanised systems (Bernardi et al., 2018) such as branch shakers and shaker combs, or traditional methods like beating or hand picking, in which the fruit falls onto nets or suspended systems. These semi-mechanised harvesting systems detach the olive in a different way, so it seems logical to think they will also produce a different damage pattern. Similarly, since damage is related to the level of energy they receive (Jiménez-Jiménez, Castro-García, Blanco-Roldán, Agüera-Vega, & Gil-Ribes, 2012), there may be a relationship with the interception system, due to the correlation between damage and the height of the olive drop (Saracoglu, Ucer, & Ozarslan, 2011).

Opara and Pathare (2014) list different procedures to characterise damage in different fresh fruit. Non-destructive techniques such spectral imaging, nuclear techniques, thermal imaging and ultrasound imaging, among others, have a great potential to determine the internal properties of fruit

and detect bruising (Stella et al., 2015; Mohammed Raju, Jannat, Wang-Hee, Changyeun, & Byoung-Kwan Cho; Du et al., 2020). Computer vision techniques are more limited in that they can only characterise external damage to fresh fruit. However, for the characterisation of green olives that will be processed Spanish style (Campus et al., 2018), visible spectral imaging may be sufficient to perform bruise characterisation with traditional, low-cost technologies. Surface damage means any defect in the exocarp of a fruit, and may be associated with damage to the innermost layers, so damage might be visible and measurable (Li & Thomas, 2014). It is difficult to establish empirical formula for the quantification of bruising, which depends on different parameters such as variety and maturity status among others. A proper characterisation should take into account the amount, shape and colour of the damage.

Bruise area is particularly suitable for the quantitative characterisation of damage. If the relationship between the bruise area and the overall fruit area is considered (Jiménez-Jiménez, Castro-García, Blanco-Roldán, González-Sánchez, & Gil-Ribes, 2013) it is possible to establish a bruise index (BI). This classification allows for a quantitative qualification of the damage, without establishing discrete levels, as proposed by Hadi, Ahmad, & Akande, 2009. It is important to take special care to quantify fruit bruising over the total surface area of the fruit. (Corkidi, Balderas-Ruiz, Taboada, Serrano-Carreón, & Galindo, 2006). The relationship of bruise index with the most commonly employed table olive harvesting systems would provide valuable information to improve the quality of mechanisation. Likewise, another parameter of interest could be the characterisation of the shape of damage in olives, in line with the considerations of other authors regarding bruise calculation in other fruits (Kitthawee, Pathaveerat, Srirungruang, & Slaughter, 2011; Mohammed et al., 2017; Van Zeebroeck et al., 2007). Image analysis can also determine the colour and ripeness of olives (Guzmán, Baeten, Pierna, & García-Mesa, 2015). Other studies (Beyaz, Martínez Gila, Gómez Ortega, & Gámez García, 2019) indicate the interest of applying similar methods to determine the colour of the type of fruit damage known as browning in the segmentation of olive damage. Bruising is changeable and requires the study of its evolution from its beginning (Jiménez-Jiménez, Castro-García, Blanco-Roldán, González-Sánchez, & Gil-Ribes, 2013).

To determine olive bruising quantitatively and qualitatively, visible imaging systems with computer techniques have shown great potential for delimiting the browned fruit areas after harvesting (Jiménez-Jiménez, Castro-García, Blanco-Roldán, González-Sánchez, & Gil-Ribes, 2013; Beyaz, Özkaya, & İcen, 2017; Ponce, Aquino, Millan, & Andujar, 2019). The aim of this article is to characterise the fruit and the bruise that occur in green table olives, specifically the 'Hojiblanca' and 'Manzanilla' varieties, employing computer vision techniques after the use of common harvesting methods. These parameters were evaluated when external damage had stabilised and, in addition, during temporal evolution. The comparison of damage quantification also took into account the entire surface of the fruit versus only one side of the fruit.

2. Materials and methods

We conducted a series of trials, which consisted of harvesting olives according to different treatments and analysing the pattern of external damage caused to the fruits by means of image analysis.

2.1. Obtaining images to characterise the olives

The olive samples were placed in 0.18 m square polylactic acid (PLA) trays, covered in blue foam with ellipsoid perforations for the placement of 20 fruits (Fig. 1). The samples were placed in a closed lighting device (Sola-Guirado, Bayano-Tejero, et al., 2020) with controlled lighting 13.95 ± 0.57 lux, and a colour temperature of 5500 K from 4 LED bars on the floor at 30° , with diffused lighting. A digital camera (Nikon, D80, Tokyo, Japan) was placed over the samples, 570 mm above the tray surface, to take photographs at an aperture setting of $f/6.3$, shutter speed $E:1/125$ s, light sensitivity ISO:160, focal length FL: 35 mm, and exposure compensation EB:-1 EV. The resolution of each photograph was 3872×2592 pixels per tray area with a fruit resolution of 226×197 pixels.

Each photograph was digitally processed by an expert using ImageJ software (National Institute of Mental Health) to characterise the fruit and its bruised area. To do this, the picture was first cut to obtain 20 individual photographs of each fruit, identified according to its treatment. Segmentation converted each photograph into a binary image to extract the fruit measurements. Then, by adding the binary photo to the original fruit photo, the background was removed, leaving only the fruit. Finally, the bruised area of each fruit was manually segmented to obtain another photograph with the bruising areas. Analysis of the pictures reported the following useful parameters for characterising the fruit and bruising pattern:

- Fruit and bruise area (mm^2): the average number of pixels of each fruit or bruise scaled with its pixel-to-millimetre conversion.

- Bruise index (%), BI: ratio between the total bruise area of each fruit and its fruit area.
- Fruit length and diameter (mm). Largest and smallest distance between two points on the fruit area, usually coinciding with the major and minor diameters of the elliptical shape of the fruit.
- Maximum Feret diameter (mm) of the bruise spot: longest distance between any two points along the spot selection boundary.
- Circularity (#): the roundness or similarity to a perfect circle of the fruit or bruised spot, which varies from 0 to 1, with 0 corresponding to an infinitely elongated polygon and 1 to a perfect circle.
- Number of spots: number of bruised spots per fruit.
- Colour: coordinates on the average RGB colour space of the pixels of each fruit without taking into account the bruised area, or of the bruised spot itself.

2.2. Harvesting treatments of trees and olive samples

We conducted the trials on two different plots of 'Manzanilla' table olives and another two plots of 'Hojiblanca' destined for green processing, located in Cordoba (Spain) during the months of September and October of the 2018/19 and 2019/20 harvesting campaigns. The trees were under irrigation and without biotic or abiotic stress. The harvesting systems used to detach the fruit were those habitually employed for this purpose: manual picking (M) as a reference treatment, manual beating with a long fiberglass pole (B), semi-mechanised with a branch shaker (BS) (Stihl, SP 481, Waiblingen, Germany), and semi-mechanised with a shaker comb (SC) (Pellenc, P230, Pertuis, France). The vibration signals produced by the harvesting methods on the main branches were recorded using a MEMS triaxial accelerometer (Gulf Coast Data Concepts LLC X200-4, Waveland, MS), with a measurement range of ± 2000 m s^{-2} , a sensitivity of 0.06 m s^{-2} and a sampling frequency of 400 Hz. Table 1 summarises the vibration patterns that characterised these systems on the branches. Each tree was harvested from branches located between 1.5 and 2.4 m above the

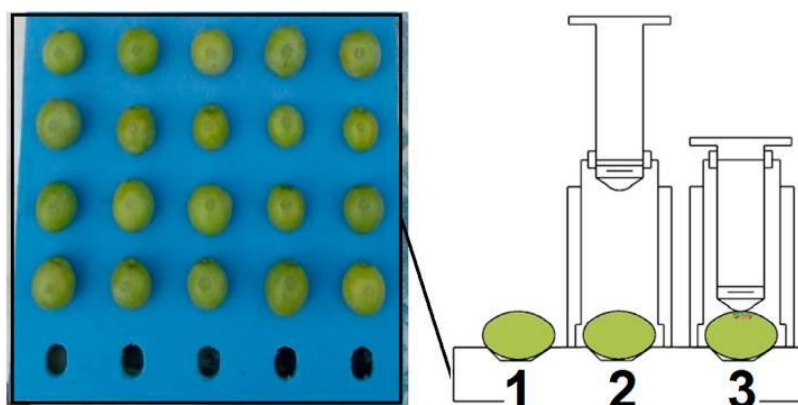


Fig. 1 – Tray with impacted fruit and sequence of impact caused by free-fall of the ball.

Table 1 – Vibration parameters of fruit-bearing branches with harvesting systems.

Harvesting method	Mean resultant acceleration ($m \cdot s^{-2}$)	Frequency (Hz)
Stick beating	560.7 ± 214.3 ^a	–
Shaker Comb	79.6 ± 42.6	14.0 ± 0.4
Branch shaker	209.3 ± 81.1	20.6 ± 1.1

Values showed are mean ± standard deviation.
^a Mean peak value.

ground by a farm worker, using the usual technique employed on the plot. An agricultural textile netting (N), as usually used in olive harvesting, was placed on the floor, along with a padding surface (P), consisting of two layers of 3 mm thick polyvinyl chloride filled with air with a diameter of 1 m at a height of 0.1 m. Olive samples were taken from the padding to study the exclusive incidence of the detachment method. In the case of the 'Manzanilla', variety, which has greater susceptibility to bruising (Jiménez-Jiménez, Castro-García, Blanco-Roldán, González-Sánchez, & Gil-Ribes, 2013), samples were also taken from the net in areas far from the padding to study the incidence of the interception means on this variety. In addition, randomly hand-collected samples without external damage were harvested and an impact or hit (H) was applied to the centre of the fruit. To perform the impact, a device was used in free fall from a height of 0.125 m with a steel ball that had a mass of 0.035 kg, applying an energy of 0.043 J (Fig. 1).

The following treatments were thereby obtained: M–P, BS–P, SC–P, B–P for 'Hojiblanca' and M–N, M–P, BS–N, BS–P, SC–N, SC–P, B–N, B–P for 'Manzanilla' and H for both varieties. The samples obtained in each of the treatments, were kept dry at an average temperature of 23 °C and photographed 150 min after harvesting, when the bruise had stabilised (Jiménez-Jiménez, Castro-García, Blanco-Roldán, González-Sánchez, & Gil-Ribes, 2013), avoiding those that circumscribe the perimeter of the plot. Three rows of trees were randomly selected and, in each row, three trees were again randomly selected to apply the treatments (1 tree exclusively used for 1 harvesting method). When selecting rows, those corresponding to the perimeter of the plot were discarded, as were the trees at the beginning and end of the row. Twenty fruit samples (1 tray) were taken from each tree for each treatment (BS–P, SC–P, B–P, BS–N, SC–N, B–N), resulting in a total 60 samples per treatment and day. Treatments with a common harvesting method were applied on the same tree, and samples were harvested simultaneously using the net or padding surface. For the reference treatment (M), olives were randomly harvested from the 3 trees in the row before application of the treatments. In case of impact treatment (H), 1 olive samples were also collected from the 3 trees for the treatments in the row, on different areas of the tree and without previous bruising. These trials were repeated 4 times per campaign and plot, spaced approximately 5 days apart, leaving a minimum difference of 4 days in the event of rainfall.

2.3. Characterisation of olives and their external damage

We conducted different types of studies to determine useful parameters for modelling olives and their bruising:

1. Size and shape characterisation: Several geometrical parameters were taken for the fruit (length, diameter, and circularity), for the bruised spots they had (number of spots, Feret diameter and circularity) and for all treatments, extracting the information from image analysis. In addition, the fruit mass (g) was measured with a digital scale (Gram, EH-500, Spain).
2. Firmness assessment: The penetration force needed to break the fruit surface was measured with a penetrometer using a cylindrical 3 mm long and 2.4 mm diameter tip (IMADA Inc., DS2-11, USA) in non-bruised and bruised areas (the latter from spot areas greater than 16 mm²).
3. Colour determination: The colorimetric characteristics of the olive in fruit areas with damage (spot area greater than 16 mm²) and without damage were measured for all treatments using a colorimeter (Konica Minolta, CR-400, USA) calibrated with a D65 2° illumination measured in CIELAB colour space. Similarly, we determined the RGB colour coordinates of the images processed.
4. Bruise index and its time evolution: The bruise index was determined 150 min after harvesting for all treatments, using image analysis to extract the fruit area and damage area. Moreover, images of the fruit impacted with the free-fall device (H) were taken every 15 min up to 150 min, to evaluate the development of bruising over time.
5. Location of the bruising on the surface of the fruit: Calculation of the bruise index normally uses a single image, ignoring what occurs in the unseen areas, considering the ellipsoid geometry of the olives. To evaluate fruit bruising considering the entire surface of the fruit, we designed a prototype (Fig. 2) to rotate the olives on their main axis. The device consists of several gears, with two needles in their centres, where randomly selected fruit samples are placed. We evaluated 60 fruit samples per harvesting treatment and variety, 150 min after their harvest. A motor (4076 steps per turn) controlled by a microcontroller (Arduino, Nano, Italy) rotated the fruit, shifting 15° at a time to take 24 pictures per fruit in each position of the revolution.

To determine the amount and location of the bruising produced over the whole surface, the pictures were processed to give a complete two-dimensional representation of the olive without deformation (Fig. 3):

- a. Each of the captured images was cropped to avoid overlapping of the same area, circumscribing an ellipse whose major diameter coincided with the fruit length

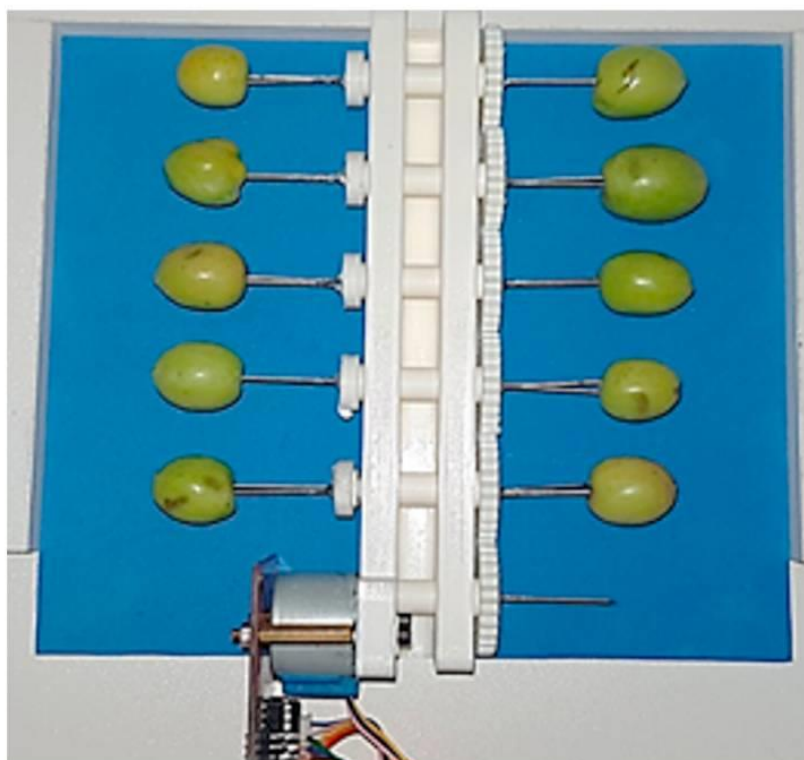


Fig. 2 – Device developed for turning olives and taking images from different sides.

and whose minor diameter is the fruit perimeter ($\pi \cdot$ diameter) divided by 24.

- b. Each cut was joined to the consecutive one.
- c. All pixels of the composition are grouped together to give continuity to the composition while maintaining the equatorial line constant.
- d. The remaining composition was enlarged by projection onto the curvature of the ellipse in the front view, i.e. by making the distance between the peduncle and its antipode coincide with half the perimeter of the ellipse determined in the front view.

In all cases, we investigated the relationship that exists for all of the studied variables with both the harvesting method and the interception method (in the case of 'Manzanilla'). We also analysed the differences between the different varieties before finally studying relationships existing within the different study parameters.

3. Results

3.1. Fruit and fruit bruising size and shape characterisation

Table 2 shows the characterisation of shape and size of the fruits sampled for the two harvesting seasons according to the different methods. Fruit mass, length and diameter variables

showed a normal distribution (Kolmogorov–Smirnov, $p > 0.05$) for both varieties. A comparison of the harvesting methods (ANOVA test, $p > 0.05$; post-hoc Tukey test, $p > 0.05$) showed no significant differences in the variables of mass, length and diameter for the two varieties and seasons, nor did we find any significant differences between the net and padding catching systems (ANOVA test, $p > 0.05$; post-hoc Tukey test, $p > 0.05$). However, we did find significant differences (Student's t-test, $p < 0.05$) within each variety in the comparison of the 2019 and 2020 seasons: The diameter and length of fruit for both varieties showed a strong positive correlation with fruit mass ('Hojiblanca': Pearson Coefficient = 0.88; Pearson Coefficient = 0.89; $p < 0.05$; 'Manzanilla': Pearson Coefficient = 0.88; Pearson Coefficient = 0.91; $p < 0.05$). Circularity did not show a normal distribution (Kolmogorov–Smirnov, $p < 0.05$). Significant differences were found in circularity between varieties (Wilcoxon–Mann–Whitney Test, $p < 0.05$), with a median value and interquartile range in 'Hojiblanca' of 0.865 (0.023) and 0.869 (0.026) in 'Manzanilla', with diffuse differences between harvesting methods.

Table 3 shows some representative parameters of the characteristic size and shape of the fruit bruising spots. The number of spots per fruit did not follow a normal distribution. For both seasons and varieties, the number of spots was significantly different (Kruskal–Wallis, $p < 0.05$) between the manual method and the other detachment methods (post-hoc Wilcoxon rank sum test with Holm adjustment, $p < 0.05$), in which there were no differences between them (post-hoc

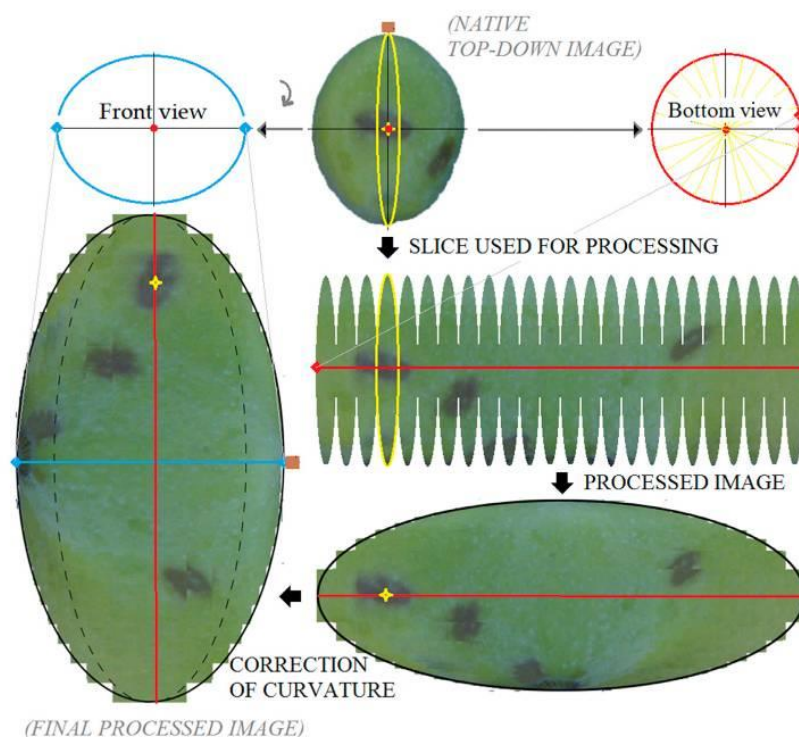


Fig. 3 – Process performed for the representation of the entire surface of an olive from the 24 photos of a fruit rotated 15°.

Table 2 – Fruit size and shape values measured in two harvesting seasons according to detachment method with padded catching and olive variety.

Detachment method	Variety	Mass (g) ^a	Length ^a	Diameter ^a	Circularity ^b
Manual	'Hojiblanca'	3.64 ± 0.84 a	22.42 ± 2.01 a	17.71 ± 1.49 a	0.869 (0.024) a
	'Manzanilla'	4.22 ± 1.00 b	22.72 ± 2.27 abc	18.62 ± 1.86 b	0.877 (0.024) b
Branch shaker	'Hojiblanca'	3.58 ± 0.83 a	22.43 ± 2.02 a	17.60 ± 1.56 a	0.864 (0.021) c
	'Manzanilla'	3.91 ± 0.98 c	22.92 ± 2.11 bd	18.47 ± 1.63 b	0.866 (0.026) ac
Shaker comb	'Hojiblanca'	3.56 ± 0.70 a	22.36 ± 1.64 a	17.68 ± 1.35 a	0.863 (0.024) c
	'Manzanilla'	3.90 ± 0.97 c	22.59 ± 2.13 ab	18.25 ± 1.78 b	0.867 (0.025) a
Stick beating	'Hojiblanca'	4.78 ± 0.86 d	23.32 ± 1.83 d	19.38 ± 1.41 c	0.878 (0.021) b
	'Manzanilla'	4.74 ± 0.79 d	23.16 ± 1.62 cd	19.35 ± 1.34 c	0.879 (0.022) b

Values shown are mean ± standard deviation or the median and the interquartile range in brackets. Different letters between rows of the same column indicate significant differences according to.

^a Normal distribution (ANOVA, $p < 0.05$; post hoc pairwise t with pooled standard deviation and Holm adjustment method, $p < 0.05$) or.

^b Non-normal distribution (Kruskal–Wallis, $p < 0.05$; post hoc Wilcoxon rank sum test with Holm adjustment method, $p < 0.05$).

Wilcoxon rank sum test with Holm adjustment, $p > 0.05$). In all cases, the number of spots within the same detachment methods increased in the net catching compared to padding catching. The circularity of spots was significantly different between detachment methods for 'Manzanilla' and 'Hojiblanca' (Kruskal–Wallis, $p < 0.05$; post-hoc Wilcoxon rank sum test with Holm adjustment, $p < 0.05$), and was lower for the latter in all cases. The mean greater Feret diameter of the spot was different (Kruskal–Wallis, $p < 0.05$; post-hoc Wilcoxon rank sum test with Holm adjustment, $p < 0.05$) between varieties and detachment methods, and slightly greater in 'Hojiblanca', except for the shaker comb, where they were the same.

3.2. Firmness assessment

Penetration force values in the bruised and non-bruised fruit zones followed a normal distribution (Kolmogorov–Smirnov, $p > 0.05$) for both varieties. Significant differences (Student's t-test, $p < 0.05$) were found between the bruised and non-bruised fruit zones in both varieties, with a value of 14.02 ± 1.92 N and 10.26 ± 1.73 N for the bruised zone in 'Hojiblanca' and 'Manzanilla', respectively, and a value of 17.11 ± 1.73 N and 13.02 ± 1.32 N for the non-bruised zones, in 'Hojiblanca' and 'Manzanilla', respectively. Within each variety there were also significant differences between the

Table 3 – Fruit bruised spot size and shape values measured in two harvesting seasons according to harvesting method and olive variety.

Detachment method	Catching method	Variety	Number of spots	Feret Diameter (mm)	Circularity
Manual	Padded	'Hojiblanca'	0 (1) a	2.35 (2.10) a	0.709 (0.235) ab
	Padded	'Manzanilla'	0 (1) a	1.62 (2.20) b	0.788 (0.314) c
	Net		2 (3) b	2.21 (2.01) ab	0.674 (0.233) ab
Branch shaker	Padded	'Hojiblanca'	1 (2) c	1.53 (1.10) b	0.725 (0.205) a
	Padded	'Manzanilla'	2 (5) b	1.34 (0.83) c	0.787 (0.191) c
	Net		3 (4) d	1.99 (1.42) b	0.704 (0.198) ab
Shaker comb	Padded	'Hojiblanca'	1 (2) c	3.04 (2.60) d	0.628 (0.211) d
	Padded	'Manzanilla'	2 (3) b	2.79 (2.16) ad	0.677 (0.201) b
	Net		3 (2) d	4.41 (2.37) e	0.580 (0.162) e
Stick beating	Padded	'Hojiblanca'	0 (2) ac	2.08 (2.61) ab	0.666 (0.379) abd
	Padded	'Manzanilla'	0 (3) ac	2.37 (2.18) abd	0.664 (0.328) abd
	Net		2 (3) b	2.28 (2.34) abd	0.628 (0.305) abd

The values represented are median and interquartile range. Different letters indicate significant differences between rows of the same column (Kruskal–Wallis, $p < 0.05$; post-hoc Wilcoxon rank sum test with Holm adjustment method, $p < 0.05$).

bruised and non-bruised zones (paired t-test, $p < 0.05$), with an average reduction in penetration force of 18% for 'Hojiblanca' and 21% for 'Manzanilla'.

In terms of harvesting methods, the fruits of both varieties followed the same trend in the non-bruised zones. There were significant differences of penetration force between the manual method, which had the highest value, and the other harvesting methods (ANOVA test, $p < 0.05$; post-hoc Tukey test, $p < 0.05$). In the non-bruised zone, no differences were found between the branch shaker and shaker comb for 'Hojiblanca' (Student's t-test, $p > 0.05$), with values of 14.91 ± 1.68 N and 14.10 ± 1.94 N, respectively, whereas differences were found between these methods for 'Manzanilla' (Student's t-test, $p < 0.05$), with values of 11.82 ± 1.05 N and 9.73 ± 1.61 N. A positive correlation of fruit penetration force with fruit weight (Pearson coefficient $p < 0.05$) was found for both varieties in manual harvesting methods, considering that the fruit measured are destined for green processing.

Penetration force values in the non-impacted zone of the fruit showed variability over time. Significant differences were found in both varieties between the first four weeks and the fifth and sixth weeks (ANOVA, post-hoc Tukey $p < 0.05$; Kruskal–Wallis, post-hoc Wilcoxon–Mann–Whitney Test $p < 0.05$). We observed that the proportion of fruits with a higher maturity (higher Jaen index), increases as weeks go by (data not shown). In addition, the value of their penetration force was different among fruits, except for those with indices of 0 and 1 (ANOVA, post-hoc Tukey $p < 0.05$; Kruskal–Wallis, post-hoc Wilcoxon–Mann–Whitney Test $p < 0.05$), which decreased in value as the maturity index increased.

3.3. Fruit and fruit bruising colour characterisation

Table 4 shows the components of CIELAB colour space measured with the colorimeter on the fruit samples tested. The values of the 'a' component showed no differences between the different campaigns for each variety (Wilcoxon–Mann–Whitney Test, $p > 0.05$), unlike the 'L' and 'b' components, which were different for each variety (Wilcoxon–Mann–Whitney Test, $p < 0.05$). In addition, we observed no significant differences between the different mechanised

harvesting methods or between the padding or net interception methods. The values of all components were higher in 'Manzanilla' than in 'Hojiblanca' in both seasons. In both varieties, negative relationships were measured between the 'a' and 'b' component of the CIELAB colour space (Spearman rho, $p < 0.05$) with significant relationships related to fruit mass and diameters (Pearson coefficient, $p < 0.05$; Spearman rho, $p < 0.05$) for 'Manzanilla'. Although this study only evaluated green fruits, when considering different maturity indices, the analysis of the fruit colour in RGB space extracted from the photographs shows a trend of colour evolution from deep green to black. (Fig. 4). Fruit colour over the six different weeks studied was significantly different (Kruskal–Wallis, $p < 0.05$) for each of the channels (RGB), with different red and green channel values for each week (post-hoc Wilcoxon–Mann–Whitney Test with Holm correction, $p < 0.05$).

3.4. Bruise index characterisation

- Bruise index 150 min after harvesting

The bruise index did not follow a normal distribution (Kolmogorov–Smirnov, $p < 0.05$). Figure 5 shows the median values obtained for the two varieties and the harvesting treatment studied. There were significant differences (Wilcoxon–Mann–Whitney Test, $p < 0.05$) for the two seasons between 'Hojiblanca' and 'Manzanilla' with greater damage suffered by 'Manzanilla'. Considering exclusively detachment method, i.e. comparing padding treatments, there were no significant differences between varieties using the manual method and manual beating with stick (Kruskal–Wallis, $p < 0.05$; post-hoc Wilcoxon rank sum test with Holm adjustment, $p < 0.05$). However, significant differences were found between varieties using the branch shaker (BI = 0.03 for 'Hojiblanca' and BI = 0.33 for 'Manzanilla') or the shaker comb (BI = 0.24 for 'Hojiblanca' and BI = 1.59 for 'Manzanilla'), with significant differences between both methods for the same variety (post-hoc Wilcoxon rank sum test with Holm adjustment, $p < 0.05$). Regarding the intercept method, i.e., comparing the same detachment method between padding and net, we found differences for all systems, which were

Table 4 – CIELAB colour space measured with the colorimeter on fruit samples impacted with the controlled energy method (H) and those harvested with the shaker comb, branch shaker and beating methods using padding in the interception.

Detachment method	Variety	L	A	b
Controlled energy (H) (damage zone)	'Hojiblanca'	52.9 ± 2.9 c	-15.1 ± 1.7 b	32.4 ± 3.2 c
	'Manzanilla'	52.6 ± 3.8 c	-11.5 ± 2.9 c	30.3 ± 3.8 d
Controlled energy (H) (undamaged zone)	'Hojiblanca'	58.6 ± 3.0 a	-19.2 ± 1.1 a	38.6 ± 2.3 a
	'Manzanilla'	62.1 ± 2.5 b	-18.8 ± 3.2 a	40.8 ± 3.5 b
Manual	'Hojiblanca'	59.5 ± 3.0 a	-18.6 ± 2.6 ad	37.8 ± 2.8 a
	'Manzanilla'	62.4 ± 2.3 b	-18.5 ± 2.0 d	39.4 ± 3.0 e
Mechanical harvesting (SC, BS, B)	'Hojiblanca'	59.0 ± 3.1 a	-19.0 ± 1.3 a	36.5 ± 4.6 f
	'Manzanilla'	61.9 ± 4.5 b	-18.3 ± 4.0 d	38.4 ± 2.9 a

Values shown are mean ± standard deviation. Different letter indicates significant differences between rows of the same column (Kruskal–Wallis, $p < 0.05$; post-hoc Wilcoxon rank sum test with Holm adjustment method, $p < 0.05$).

* The colorimeter was placed on a random area of the fruit regardless of whether the area was damaged or not, except for the controlled energy method, in which it was positioned just above the area impacted by the ball.



Fig. 4 – Colour evolution (R) during table olive ripeness throughout the harvesting season (median of the values in RGB space for Hojiblanca y Manzanilla). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

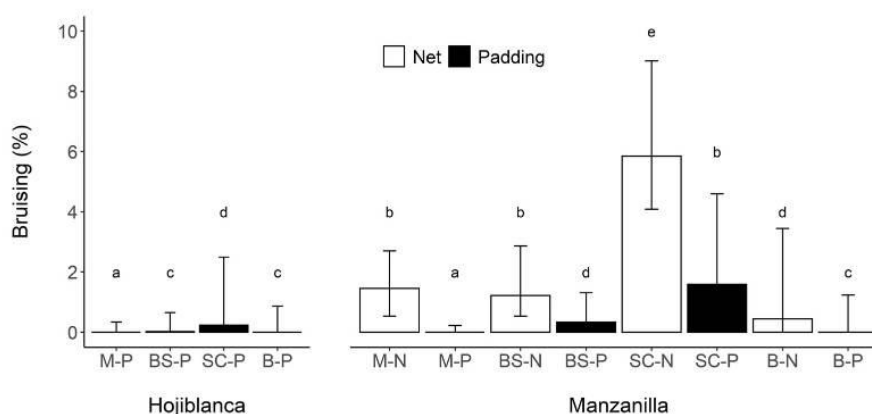


Fig. 5 – Bruise index for each treatment of fruit detachment (M: manual by hand, BS: branch shaker, SC: shaker comb, B: manual beating) and interception (N: nets, P: padding) and for each olive variety. The values shown represent median and interquartile range (Kruskal–Wallis, $p < 0.05$; post-hoc Wilcoxon rank sum test with Holm adjustment method, $p < 0.05$).

significantly higher with a net intercept (Kruskal–Wallis, $p < 0.05$; post-hoc Wilcoxon rank sum test with Holm adjustment, $p < 0.05$). The highest values were found using the shaker comb for both seasons and varieties with greater values in 'Manzanilla' (BI = 1.59 for padding and BI = 5.85 for net).

It is possible to make a nominal classification by placing bruise index limits (BI = 0, $0 < BI < 1$, $1 < BI < 3$, $3 < BI < 5$, $BI > 5$) in order to compare the level of damage studied by other authors (Castro-Garcia, Castillo-Ruiz, Jimenez-Jimenez, Gil-Ribes, & Blanco-Roldan, 2015: no damage, slight damage, moderate damage, severe damage, mutilated). However, this is only a proposal of thresholds since these authors used a visual classification so did not quantify the area of bruising

used to define the limits. Figure 6 shows the distribution of bruising in the sampled fruit with our proposed classification. With the thresholds, we obtained a distribution of the level of damage caused by each harvesting method studied (Fig. 7).

- Bruise index and its development over time

Figure 8 shows the temporal evolution of the bruise index from the time the controlled method (H) impacted the olive. Bruise index values at different times post impact showed significant differences (Student's t-test, $p < 0.05$; Wilcoxon–Mann–Whitney Test, $p < 0.05$) between varieties. The median bruise index values were fitted to a logarithmic

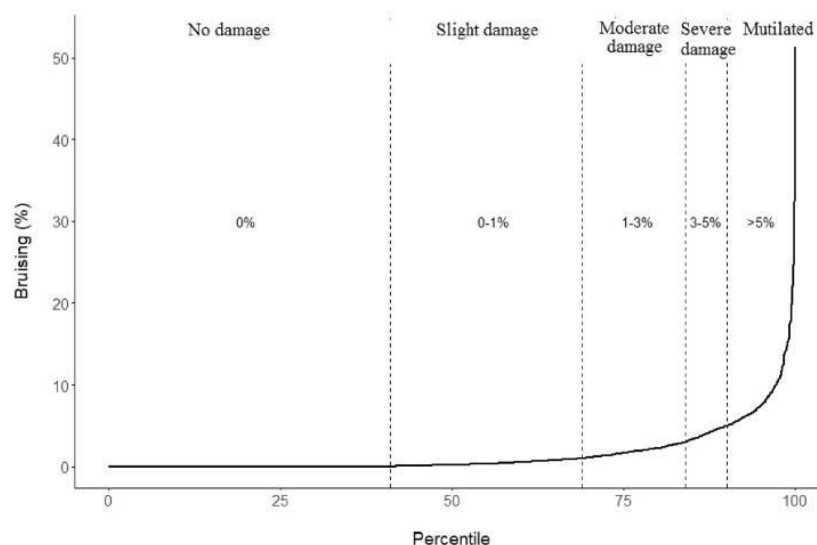


Fig. 6 – Distribution of bruising values, boundary lines of each damage category shown with vertical dotted lines.

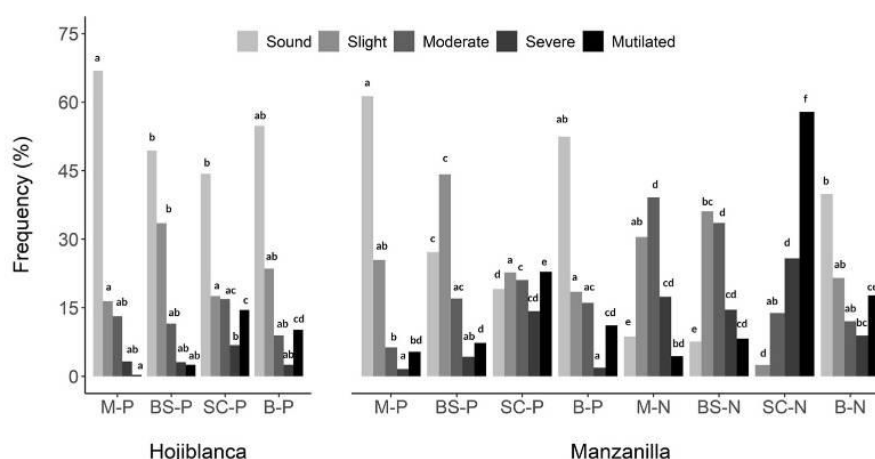


Fig. 7 – Frequency of damage category for each treatment of fruit detachment (M: manual by hand, BS: branch shaker, SC: shaker comb, B: manual beating) and interception (N: nets, P: padding) and for each olive variety. Different letter indicates significant differences between treatments in the same damage category (pairwise two-samples Z-test of proportions with Holm adjustment method, $p < 0.05$).

function in relation to the time post impact. Figure 9 illustrates the colour differences of the bruised spots between the RGB colour channels over time. Colour differences between the two varieties of fruit over the time were found in the red and green channel (Friedman Test $p < 0.05$) but not in the blue channel. The greatest changes over time occurred in the green channel, where values decreased with a greater slope in 'Manzanilla'.

- Location of the bruising on the surface of the fruit

Figure 10 shows the differences in the bruise index between analysing a single image that partially captures the

surface of the fruit, and the proposed system, which captures the entire fruit surface. The methods based on branch shakers and manual harvesting showed significant differences between the bruise index determined from a single photo or from the whole perspective in true magnitude. Conversely, harvesting methods with shaker comb and beating showed no significant differences. In general, when the image of the spread external surface of the fruit is considered, there is a marked increase in the percentage of bruising, a median 140%, considering that 100% is the estimated bruising from a single unprocessed zenithal picture, although a high deviation exists in some cases.

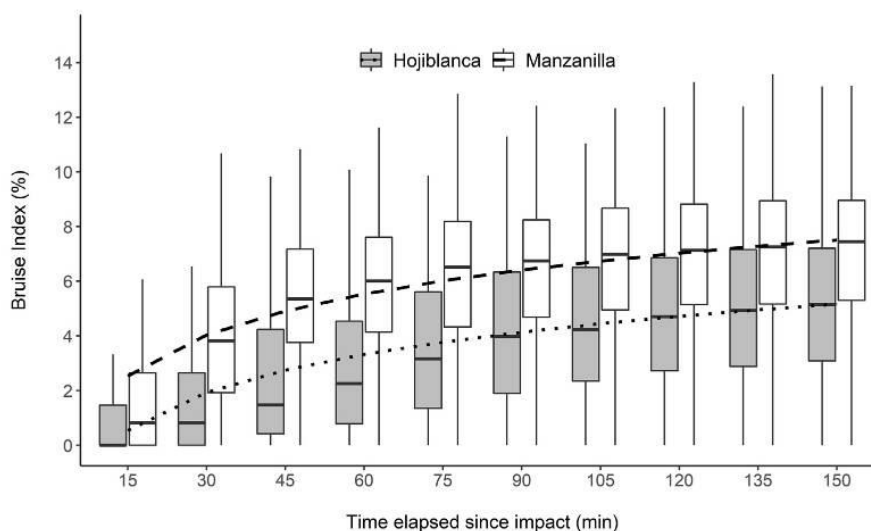


Fig. 8 – Temporal evolution of bruising colour in RGB colour space post impact for 'Hojiblanca' (grey) and 'Manzanilla' (white) varieties measured from the images.

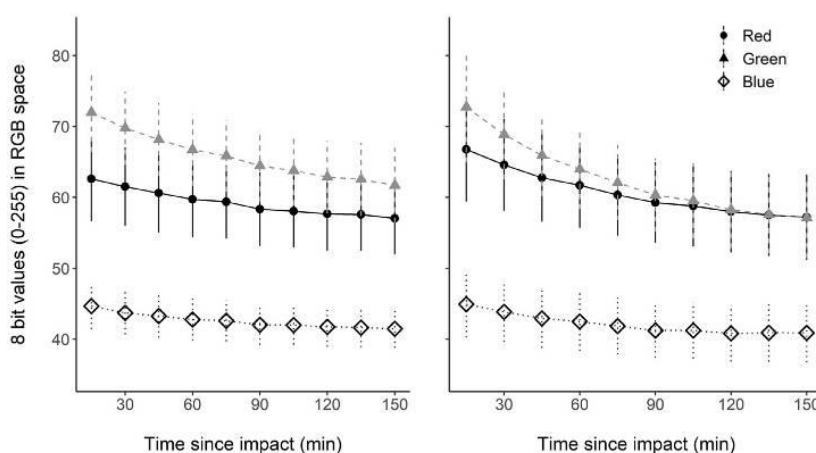


Fig. 9 – Temporal evolution of bruising colour in RGB colour space, post impact, for 'Hojiblanca' (left) and 'Manzanilla' (right) varieties measured from the images. Dots indicate the means values and upper-lower lines indicate the standard deviation.

4. Discussion

Within each variety, the size of the fruit detached was not related to the harvesting method used, except in the case of manual detachment using sticks (Table 2). The basis of this method is impact on the bearing branches, which has a higher incidence on larger fruit and therefore a lower fruit detachment force by mass ratio (Famiani et al., 2014). Our observations showed that the circularity of the harvested fruit is significantly different with manual methods (manual and stick beating) than with mechanised methods (branch shaker and shaker comb) for the same variety. In almost all cases, the size and shape of the varieties was significantly different due to their own physiology (Belaj, Satovic, Rallo, & Trujillo, 2002).

There was a strong relationship between geometry and fruit mass, which other authors have already indicated (Ponce, Aquino, Millán, & Andújar, 2018). The number of spots on the harvested fruit showed the clear difference between manual and mechanised harvesting in the process of fruit detachment, in addition to indicating how interception with a net increases the amount of damage (Table 3), suggesting the need to address fruit interception with padded harvesting systems (Plasquy, Sola-Guirado, del Carmen-Florida, García & Blanco-Roldán, 2019; Ravetti & Robb, 2010). The average diameter of the spots caused by the different methods seems to be a determining factor for their characterisation, depending exclusively on the detachment method, with significant differences observed for 'Manzanilla' and 'Hojiblanca' between the manual, branch shaker and shaker comb methods, and for

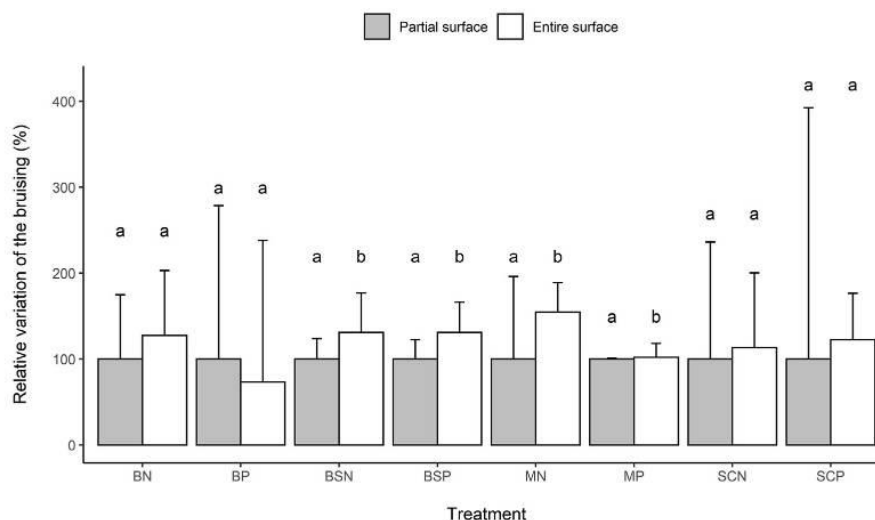


Fig. 10 – Relative variation of the bruising for each treatment of fruit detachment (M: manual by hand, BS: branch shaker, SC: shaker comb, B: manual beating) and interception (N: nets, P: padding) between one side of the fruit (grey) and the whole fruit (white). The bruising evaluated on one side was set as 100%. Different letters indicate differences within the same treatment between different observed surfaces (Wilcoxon Mann–Whitney rank sum test, $p < 0.05$).

varieties (Table 3). For the 'Manzanilla' variety, if we compare the diameters obtained with padded-surface versus netting interception, we observe that when padding is used, the diameter is reduced for all harvesting methods, except for stick beating, where the diameter remains very similar. In addition, when net interception is used there is a change in the shape of the spot, indicated by a decrease in circularity, whereas the spots in shaker comb and stick beating (Table 3) are more elongated. This may be due to the operation of the latter systems, which put the rods in direct contact with the fruit and branches.

Fruit firmness is a quality attribute for table olives. High firmness values favour a decrease in fruit damage by having lower deformation values on impact, which ultimately influence the distribution of fruit cell damage (Jiménez, Rallo, Rapoport, & Suárez, 2016). The results obtained confirmed this where 'Hojiblanca', with higher firmness values, suffered less damage compared to 'Manzanilla'. Cuticle thickness may therefore be an indicator of the table olive cultivars that are suitable for mechanical harvesting (Goldental-Cohen et al., 2019). In our work, we observed no differences dependent on harvesting method for fruit firmness in the bruising area, however, there were differences in the firmness of fruit harvested by hand compared with other harvesting methods, as other authors have observed (Morales-Sillero, Rallo, Jiménez, Casanova, & Suárez, 2014). In the case of 'Manzanilla', with a higher stone pulp ratio, there were differences when using the branch shaker and shaker comb, and it is the fruit harvested with the latter method that showed the lowest firmness. It seems that fruit with a higher bruise index, as in the case of harvesting with the shaker comb, had a lower firmness although we did not obtain significant correlations. Differences in firmness as the harvesting season progresses may indicate that fruit increases in size and, after the first growth

phase, the concentration of solutes and water loss continues, which results in a greater susceptibility of the fruit skin to mechanical damage (Kiliçkan & Güner, 2008). Therefore, ascertaining the optimal harvesting period for this fruit is so important, as the aim is to obtain fruit with greatest size and rigidity, but without excessive fruit detachment forces that reduce the harvesting efficiency of mechanical systems.

Fruit colours measured in CIELAB space were slightly different between varieties, which indicates that colour may be another interesting discretisation factor between varieties. The higher values observed for 'Manzanilla' indicate brighter fruit and straw-green tones, while the lower values of 'Hojiblanca' result in darker fruit with bluish-green tones. When switching from manual to mechanised harvesting, the values in the 'a' channel increased and those in the 'L' and 'b' channels decreased, showing a significant difference in the 'b' channel, in accordance with the reports of Morales-Sillero et al. (2014). This variation, mainly in the green tone of the fruit, may result from the greater number of brown spots due to the use of mechanical harvesting, which produces a significantly different colour compared to the rest of the fruit (Riquelme et al., 2008) as seen in the controlled energy method (H) (Table 4). This also suggests that colour is an interesting control parameter for measuring the level of damage in fruits as a function that considers the percentages of green or browning, as reported by Goldental-Cohen et al. (2019). However, it is important to note that this is only possible for fruits at a specific stage of maturity since colour evolves throughout the harvesting season (Fig. 4) as reported by Sola-Guirado, Bayano-Tejero, et al. (2020).

'Manzanilla' was more susceptible to bruising and had higher bruise index values in all cases, as Jiménez-Jiménez, Castro-García, Blanco-Roldán, González-Sánchez, and Gil-Ribes (2013) reported in a drop test. There were differences in the bruise index between the harvesting systems studied

and for the varieties, and this is clearly higher for the shaker comb due to the direct contact of the rods with the foliage. Thus, the bruise index can also be a control parameter for evaluation of the harvesting system used on fruit. It is important to note that this index considers the area of fruit damaged in relation to the area of the fruit, but not the depth measured by the volume of fruit bruising, which would require other types of evaluation techniques (Jiménez-Jiménez, Castro-García, Blanco-Roldán, Ferguson, et al., 2013; Morales-Sillero et al., 2014). The bruise index is related with the level of energy applied on fruit, such that lower energy levels will result in lower levels of damage (Jiménez-Jiménez et al., 2012). However, the energy levels required for table olives, are higher than those used for harvesting olives for oil (Sola-Guirado et al., 2014), due to an earlier harvesting (Famiani et al., 2014). In fact, to improve harvest efficiency, it is often necessary to use a combination of systems, such as trunk shakers with auxiliary harvesting systems (Zipori, Dag, Tugendhaft, & Birger, 2014). Moreover, when the energy received to detach fruit is added to the potential energy of the drop, damage is even greater, as observed in this work when the drop is over a net (Fig. 5). The relationship between the increase in bruising and height of fall, and with the contact surface (Saracoglu et al., 2011) again indicates the importance of studying interception systems in fresh fruit harvesting (Hussein et al., 2020), especially in 'Manzanilla'. This is even more the case when using management and cleaning systems on harvesters, which cause increased fruit damage (Sola-Guirado, Castillo-Ruiz, et al., 2020). Figure 7 shows the quantitative difference in damage by category according to severity. With net interception, the percentages of sound and slightly damaged fruit decrease and those of the other categories increase compared to padding interception, which is especially noticeable for the shaker comb. This classification of the bruise index according to severity of damage may be of major interest since with low levels of damage it is possible to reverse browning by pre-treatment with a diluted solution of NaOH, the use of cold (Zipori et al., 2014; Campus et al., 2018) or a nitrogen atmosphere (Segovia-Bravo, García-García, López-López, & Garrido-Fernández, 2012). In this way, minor damage can be minimised, and it is possible to reduce other damage in postharvest, as reported by Zipori et al. (2021). It is important to know how damage evolves over time in order to apply post-harvest treatments judiciously. Figure 8 shows how, at approximately 150 min after harvesting, the area of visible damage stops growing and stabilises, coinciding with the reports of Jiménez-Jiménez et al. (2013a), although damage continues to evolve internally up to 24 h (Jiménez et al., 2016). 'Hojiblanca' follows the same trend, although from the onset of impact its damaged area is smaller. We also observe an evolution of spot colour, which starts as dark green and transforms to brown (Fig. 9, in RGB space) (Table 4, in CIELAB space). These colour changes also differed between varieties, with a greater incidence in the green and red channels of RGB space. All of which indicates that the first hour is key to reduce the damaged area by application of the corresponding treatments (Segovia-Bravo, García-García, López-López, & Garrido-Fernández, 2011).

Part of the objective of this work is to characterise the bruise pattern of harvested green olives. It is a complex task to

quantify the real amount of external bruising on a fruit or batches of fruit from a single photograph using computer vision because only a portion of the surface is perceived and, moreover, this is as a two-dimensional projection. The latter problem can be partially solved by correcting the projection (Mon & ZarAung, 2020). To maximise the sampled area per fruit, it is common to use mirrors (Reese, Lefcourt, Kim, & Lo, 2009), more than one camera (Xul, Zou, & Zhao, 2008) or rotating mechanisms (Cubero et al., 2014). These methods improve the estimated value with respect to the real value, allowing analysis of the whole or almost the whole the fruit surface. This work used a turning mechanism to observe the entire surface of the olive in order to estimate what percentage of information is lost when using a single photograph. The differences found for the harvesting methods tested may be due to the way in which they detach the fruit. With the shaker comb and beating, impacts on the olive can be produced by direct contact, generating a more heterogeneous punctual damage, and the value estimated with a single photo may be more conditioned by the part of the olive that is visible. However, the branch shaker, which acts directly on the branch and causes fruit detachment by vibration transmission, may produce damage, caused by some fruit hitting against others or against the branches and leaves, that is more homogeneous and distributed over the whole surface of the fruit. It is important to note that the percentage of bruising is a relative measure and depends on the amount of damage, i.e. the sum of the various bruise areas divided by the surface area of the fruit sampled. For this reason, the percentage of bruising on a fruit obtained from a single photograph may be higher than that obtained from the composite of the spread external surface, which only occurs for the beating method with padding. Therefore, it would be advisable to multiply the bruising value obtained from a single image by a value greater than 1 to provide a more realistic value for the bruising.

In terms of image processing requirements and time, the method used to obtain segmentation of the bruised areas requires a high manual component and therefore high consumption of time. Some improvements achieve better processing times, as is the case with machine learning techniques, but generate uncertainty (Sola-Guirado, Bayano-Tejero, et al., 2020). However, the manual method of analysis is the most suitable to obtain higher accuracy of results in the characterisation of fruit bruising. In this aspect, the spectrum used for the analysis is determinant because the results obtained in olives may differ when using RGB space colour (Jiménez-Jiménez, Castro-García, Blanco-Roldán, González-Sánchez, & Gil-Ribes, 2013), a combination of HSV and RGB (Riquelme et al., 2008) or another spectrum such as near infrared (Jiménez-Jiménez et al., 2012; Stella et al., 2015).

The results obtained in this study are especially interesting for pre- or post-harvest decision-making in olive farm management. For instance, deployed in systems on board machinery, some of the parameters characterised in this paper that are determined by computer vision systems could perform harvest estimates without the need for weighing by assigning a mass unit per fruit according to geometric or varietal parameters (Table 2). Another application, in industrial processing systems, could be determination of the amount and provenance of damage in terms of the harvesting

system employed. The influence of factors involved in the process could serve to improve new mechanised harvesting systems and, in addition, help the farmer choose the most suitable one according to his conditions. Furthermore, it may influence industrial processing, since it facilitates an improved visual aspect of the olive after harvest, depending on the level of damage caused and the time of transport. Current marketing standards for certain parameters such as external defects set by tolerance are not yet demanding, but these parameters will develop and will, almost certainly, require further details in the future. Therefore, the application of techniques based on computer vision to obtain the largest number of olive parameters (Guzmán et al., 2015; Martínez Satorres, Martínez Gila, Beyaz, Gómez Ortega, & Gámez García, 2018; Ponce et al., 2018; Puerto, Gila, García, & Ortega, 2015) will be a reality in the industrial field in coming years.

5. Conclusions

This work reported the qualitative and quantitative knowledge of fruit and fruit bruising according to the type of harvesting system used. Different olive bruise patterns have been found depending on the harvesting system used. There are differences in the fruit morphological parameters of the 'Hojiblanca' and 'Manzanilla' varieties in parameters such as mass, length, diameter and circularity. The parameters of shape (circularity of Feret diameter) and number of spots can be useful descriptors to differentiate between the harvesting systems studied, with a strong differentiation between manual and mechanised harvesting. The firmness in the bruised area is lower than in the rest of the fruit, being significantly different between hand and mechanised harvesting methods. The colour b-value (cieLAB) can discern between manual and mechanised harvesting. The 'Manzanilla' variety has a greater damage than 'Hojiblanca' in all the cases studied, and the branch shaker system is the one that produced the greatest damage to the fruit, in general. The number of damages is significantly higher when fruit interception is carried out on nets than when a padded system is used. A numerical quantification of the bruise index according to various categories has been proposed. With this classification, each harvesting system has a different distribution of the damage it generates. A study of the bruise from the composite of the fruit spread external surface has been carried out and it has been identified that the amount of damage differs from that considered with the common method of one zenithal image of the fruit.

Funding for open access charge

Universidad de Córdoba / CBUA.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

Innovar Project, - Public Purchase of Innovation in its Pre-commercial modality-, in accordance with the Agreement established between the former Ministry of Economy, Industry and Competitiveness (current Ministry of Science, Innovation) and the University of Cordoba, 80% co-financed by FEDER funds, within the Pluri-regional Operative Program of Spain 2014–2020. We would also like to thank the financial support provided by the Interprofessional Organisation of Table Olive and Olive Oil, Spain <https://interaceituna.com/>. The authors would like to thank Juan Pérez Moya for his technical support.

REFERENCES

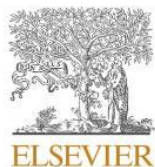
- Belaj, A., Satovic, Z., Rallo, L., & Trujillo, I. (2002). Genetic diversity and relationships in olive (*Olea europaea* L.) germplasm collections as determined by randomly amplified polymorphic DNA. *Theoretical and Applied Genetics* volume, 105, 638–644. <https://doi.org/10.1007/s00122-002-0981-6>
- Bernardi, B., Falcone, G., Stillitano, T., Benalia, S., Strano, A., Bacenetti, J., et al. (2018). Harvesting system sustainability in Mediterranean olive cultivation. *The Science of the Total Environment*, 625, 1446–1458. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.005>
- Beyaz, A., Martínez Gila, D. M., Gómez Ortega, J., & Gámez García, J. (2019). Olive fly sting detection based on computer vision. *Postharvest Biology and Technology*, 150(January), 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.01.003>
- Beyaz, A., Özkaya, M. T., & İçen, D. (2017). Identification of some Spanish olive cultivars using image processing techniques. *Scientia Horticulturae*, 225(May), 286–292. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.06.041>
- Campus, M., Degirmencioglu, N., & Comunian, R. (2018). Technologies and trends to improve table olive quality and safety. *Frontiers in Microbiology*, 9(APR). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00617>
- 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, 388–395. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.11.012>
- Corkidi, G., Balderas-Ruiz, K. A., Taboada, B., Serrano-Carreón, L., & Galindo, E. (2006). Assessing mango anthracnose using a new three-dimensional image-analysis technique to quantify lesions on fruit. *Plant Pathology*, 55(2), 250–257. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2005.01321.x>
- Cubero, S., Aleixos, N., Albert, F., Torregrosa, A., Ortiz, C., García-Navarrete, O., et al. (2014). Optimised computer vision system for automatic pre-grading of citrus fruit in the field using a mobile platform. *Precision Agriculture*, 15(1), 80–94. <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9324-7>
- Du, Z., Zeng, X., Li, X., Ding, X., Cao, J., & Jiang, W. (2020). Recent advances in imaging techniques for bruise detection in fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 99(January), 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.024>
- Famiani, F., Farinelli, D., Rollo, S., Camposeo, S., Di Vaio, C., & Inglesse, P. (2014). Evaluation of different mechanical fruit harvesting systems and oil quality in very large size olive trees. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 12, 960–972. <https://doi.org/10.5424/sjar/2014124-5794>

- FAO. (2019). Data of the olive crop. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. (Accessed 1 March 2021).
- Ferguson, L., Rosa, U. A., Castro-García, S., Lee, S. M., Guinard, J. X., Burns, J., et al. (2010). Mechanical harvesting of California table and oil olives. *Advances in Horticultural Science*, 24(1), 53–63. <https://doi.org/10.1400/132343>
- Goldental-Cohen, S., Biton, I., Many, Y., Ben-Sason, S., Zemach, H., Avidan, B., et al. (2019). Green olive browning differ between cultivars. *Frontiers of Plant Science*, 10, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01260>
- Guzmán, E., Baeten, V., Pierna, J. A. F., & García-Mesa, J. A. (2015). Determination of the olive maturity index of intact fruits using image analysis. *Journal of Food Science & Technology*, 52(3), 1462–1470. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1123-7>
- Hadi, S., Ahmad, D., & Akande, F. B. (2009). Determination of the bruise indices of oil palm fruits. *Journal of Food Engineering*, 95(2), 322–326. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.05.010>
- Hussein, Z., Fawole, O. A., & Opara, U. L. (2020). Harvest and postharvest factors affecting bruise damage of fresh fruits. *Horticultural Plant Journal*, 6(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2019.07.006>
- IOC. (2020). Table olive figures. <https://www.internationaloliveoil.org/wp-content/uploads/2020/12/OT-W901-23-11-2020-P.pdf>. (Accessed 1 March 2021).
- Jiménez-Jiménez, F., Castro-García, S., Blanco-Roldán, G. L., Agüera-Vega, J., & Gil-Ribes, J. A. (2012). Non-destructive determination of impact bruising on table olives using Vis-NIR spectroscopy. *Biosystems Engineering*, 113(4), 371–378. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.09.007>
- Jiménez-Jiménez, F., Castro-García, S., Blanco-Roldán, G. L., Ferguson, L., Rosa, U. A., & Gil-Ribes, J. A. (2013b). Table olive cultivar susceptibility to impact bruising. *Postharvest Biology and Technology*, 86, 100–106. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.06.024>
- Jiménez-Jiménez, F., Castro-García, S., Blanco-Roldán, G. L., González-Sánchez, E. J., & Gil-Ribes, J. A. (2013a). Isolation of table olive damage causes and bruise time evolution during fruit detachment with trunk shaker. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 11(1), 65–71. <https://doi.org/10.5424/sjar/2013111-3399>
- Jiménez, M. R., Rallo, P., Rapoport, H. F., & Suárez, M. P. (2016). Distribution and timing of cell damage associated with olive fruit bruising and its use in analyzing susceptibility. *Postharvest Biology and Technology*, 111, 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.07.029>
- Kiliçkan, A., & Güner, M. (2008). Physical properties and mechanical behavior of olive fruits (*Olea europaea* L.) under compression loading. *Journal of Food Engineering*, 87, 222–228. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.11.028>
- Kitthawee, U., Pathaveerat, S., Srirungruang, T., & Slaughter, D. (2011). Mechanical bruising of young coconut. *Biosystems Engineering*, 109(3), 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.04.002>
- Li, Z., & Thomas, C. (2014). Quantitative evaluation of mechanical damage to fresh fruits. *Trends in Food Science & Technology*, 35(2), 138–150. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.12.001>
- Martínez Satorres, S., Martínez Gila, D., Beyaz, A., Gómez Ortega, J., & Gámez García, J. (2018). A computer vision approach based on endocarp features for the identification of olive cultivars. *Computers and Electronics in Agriculture*, 154, 341–346. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.017>
- Mohammed Raju, A., Jannat, Y., Wang-Hee, L., Changyeun, M., & Byoung-Kwan, C. (2017). Imaging technologies for nondestructive measurement of internal properties of agricultural products: A review. *Biosystems Engineering*, 42(3), 199–216.
- Mon, T., & ZarAung, N. (2020). Vision based volume estimation method for automatic mango grading system. *Biosystems Engineering*, 198, 338–349. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.08.021>
- 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, 1028–1033. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.49.8.1028>
- Opara, U. L., & Pathare, P. B. (2014). Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce-A review. *Postharvest Biology and Technology*, 91, 9–24. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.12.009>
- Plasquy, E., Sola-Guirado, R. R., del Carmen Florido, M., García, J. M., & Blanco-Roldán, G. (2019). Evaluation of a manual olive fruit harvester for small producers. *Research in Agriculture Engineering*, 65, 105–111. <https://doi.org/10.17221/18/2019-RAE>
- Ponce, J. M., Aquino, A., Millán, B., & Andújar, J. M. (2018). Olive-fruit mass and size estimation using image analysis and feature modeling. *Sensors*, 18(9). <https://doi.org/10.3390/s18092930>
- Ponce, J. M., Aquino, A., Millán, B., & Andujar, J. M. (2019). Automatic counting and individual size and mass estimation of olive-fruits through computer vision techniques. *IEEE Access*, 7, 59451–59465. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2915169>
- Puerto, D. A., Gila, D. M. M., García, J. G., & Ortega, J. G. (2015). Sorting olive batches for the milling process using image processing. *Sensors*, 15, 15738–15754. <https://doi.org/10.3390/s150715738>
- Ravetti, L., & Robb, S. (2010). Continuous mechanical harvesting in modern Australian olive growing systems. *Advances in Horticultural Science*, 24, 71–77. <https://doi.org/10.1400/132345>
- Reese, D., Lefcourt, A. M., Kim, M. S., & Lo, Y. M. (2009). Using parabolic mirrors for complete imaging of apple surfaces. *Bioresource Technology*, 100(19), 4499–4506. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.059>
- Rejano, L., Montaña, A., Casado, F. J., Sánchez, A. H., & De Castro, A. (2010). Table olives: Varieties and variations. In *Olives and olive oil in health and disease prevention (Issue c)*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374420-3.00001-2>.
- Riquelme, M. T., Barreiro, P., Ruiz-Altisent, M., & Valero, C. (2008). Olive classification according to external damage using image analysis. *Journal of Food Engineering*, 87(3), 371–379. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.12.018>
- Royal Decree 679/2016, of December 16. (2016). Which establishes the quality standard for table olives., No 304 B.O.E. 88525. <https://www.boe.es/boe/dias/2019/01/12/pdfs/BOE-A-2019-317.pdf>.
- Sánchez-Gómez, A. H., García-García, P., & Garrido-Fernández, A. (2013). Spanish-style green table olive shelf-life. *International Journal of Food Science and Technology*, 48(8), 1559–1568. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12124>
- Saracoglu, T., Ucer, N., & Ozarslan, C. (2011). Engineering properties and susceptibility to bruising damage of table olive (*Olea europaea*) fruit. *International Journal of Agriculture and Biology*, 13(5), 801–805.
- Segovia-Bravo, K. A., García-García, P., López-López, A., & Garrido-Fernández, A. (2011). Effect of bruising on respiration, superficial color, and phenolic changes in fresh Manzanilla olives (*Olea europaea pomiformis*): Development of treatments to mitigate browning. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59, 5456–5464. <https://doi.org/10.1021/jf200219u>
- Segovia-Bravo, K. A., García-García, P., López-López, A., & Garrido-Fernández, A. (2012). Effect of inert atmosphere on the postharvest browning of Manzanilla olives and optimization by response surface methodology of the aqueous treatments.

- Journal of Food Science*, 77(5), 194–201. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02666.x>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105858>
- Sola-Guirado, R. R., Castillo-Ruiz, F. J., Blanco-Roldán, G. L., Gonzalez-Sanchez, E., & Castro-García, S. (2020). Mechanical canopy and trunk shaking for the harvesting mechanization of table olive orchards. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 52(2), 124–139.
- 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(1), 186–193. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.12.007>
- Stella, E., Moschetti, R., Haff, R. P., Monarca, D., Cecchini, M., Contini, M., et al. (2015). Review: Recent advances in the use of non-destructive near infrared spectroscopy for intact olive fruits. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 23(4), 197–208. <https://doi.org/10.1255/jnirs.1169>
- Van Zeebroeck, M., Van linden, V., Darius, P., De Ketelaere, B., Ramon, H., & Tijskens, E. (2007). The effect of fruit factors on the bruise susceptibility of apples. *Postharvest Biology and Technology*, 46(1), 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.03.017>
- Xu, Q., Zou, X., & Zhao, J. (2008). On-line detection of defects on fruit by Machinevision systems based on three-color-cameras systems. In *International conference on computer and computing technologies in agriculture* (pp. 2231–2238). Boston, MA: Springer.
- Zipori, I., Dag, A., Tugendhaft, Y., & Birger, R. (2014). Mechanical harvesting of table olives: Harvest efficiency and fruit quality. *HortScience*, 49(1).
- Zipori, I., Fishman, A., Zelas, Z. B. B., Subbotin, Y., & Dag, A. (2021). Effect of postharvest treatments of mechanically harvested “Manzanilla” table olives on product quality. *Postharvest Biology and Technology*, 174(111462). <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111462>

Anexo II

Estimation of harvested fruit weight using volume measurements with distance sensors: A case study with olives in a big box



Estimation of harvested fruit weight using volume measurements with distance sensors: A case study with olives in a big box

Sergio Bayano-Tejero^a, Manoj Karkee^c, Antonio Rodríguez-Lizana^{a,d}, Rafael R. Sola-Guirado^{a,b,*}

^a R.G. AGR 126 "Mechanization and Rural Technology". Spain

^b Department of Mechanics, University of Cordoba, Spain

^c Biological Systems Engineering Department, Washington State University, United States

^d Department of Aerospace Engineering and Fluid Mechanics, University of Seville, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:

ToF
3D camera
Load cells
Yield monitor
Mechanization

ABSTRACT

The introduction of fruit tree harvesters on the market allows the opportunity to incorporate new yield monitors. Traditionally, yield has been measured by in-the-field fruit batch weighing systems that employ load cells, which present certain problems as well as oscillations and outliers. We propose the development and evaluation of two distance measurement systems (an experimental one using an array of sensors with low-cost, Time-of-Flight technology and another, commercial system, with a 3D camera) to estimate the volume of fruit harvested in a big box and correlate the volume with its weight. To this end, two algorithms were developed to estimate the volume of fruit filling. Several tests were conducted to determine the field of view of the sensors and the influence of illumination, reflectivity of different surfaces, and vibrations in transit on the measurements they give. Illumination was a limiting factor on the accuracy of the experimental system and required mitigating actions to operate with it. The mean relative error of sensor distance measurement was less than 0.8 % and 1.6 % for the commercial and experimental systems, respectively, which decreased as distance from the measurement target increased. Measurements on matte surfaces showed a lower measurement error than those on glossy surfaces, with error being twice as high in the commercial system than in the experimental system. The error in volume estimation was lower in the commercial system and could be reduced to less than 1.6 % with pre-calibration. In general, with the accelerations typical of agricultural traffic, in dynamic operation the distance sensors provided less variation in results than the load cells, which would require processing of the recorded signals. In the range of filling a box over 150 kg, the absolute error in weight estimation was 5.4 kg for the experimental system and 11.0 kg for the commercial system. However, this error may increase with the use of the experimental system if filling occurs from the center or from the corner. In general, the systems offer acceptable results for using this technology if extreme accuracy is not required. This work establishes the basics of a technology that can be an alternative to load cells and be applied to harvesting machinery to record continuous real-time production.

1. Introduction

Harvesting is one of the most important operations in the production of fruit crops such as olive, citrus, or nuts. This operation can be carried out manually, semi-manually using hand-held machines, or with massive harvesters such as trunk or canopy shakers. Whatever the crop, the harvested fruit is loaded into storage systems or containers of different types and geometries, which are filled and transported around the plot until their capacity is reached. For several years, with the

mechanization of crop production systems and the use of harvesters, yield monitoring systems have been implemented on some harvesters to record and map (georeferenced) the amount harvested in real time (Chang et al., 2012; Corredo et al., 2021). The information recorded by a yield monitor facilitates farm analysis and decision-making for effective management with precision farming techniques (Shafi et al., 2019). In addition, it allows management of product traceability by allowing registration of different batches of harvested fruit and establishing a field-industry connection (Bayano-Tejero et al., 2019). All of which is

* Corresponding author at: R.G. AGR 126 "Mechanization and Rural Technology". Spain.
E-mail address: ir2sogur@uco.es (R.R. Sola-Guirado).

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107620>

Received 25 July 2022; Received in revised form 3 November 2022; Accepted 1 January 2023

Available online 8 January 2023

0168-1699/© 2023 The Author(s). Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

vital to give added value to the product and establish a detailed control in the face of legislation that increasingly demands more traceability, transparency and information on the product being consumed (Qian et al., 2020).

For certain crops, such as grapevine or grain crops, there is a widespread use of yield monitors, which use different technologies to determine the amount of crop harvested. Grape harvesters commonly employ a system of load cells mounted under the discharge belt together with a speed sensor to measure belt speed, thus estimating the weight of harvested fruit (Taylor et al., 2016). Some studies have employed volumetric flow meters with ultrasonic sensors in combination with the fruit density coefficient (Taylor, 2004). The systems used for grain crops often utilize impact plates that measure the displacement of the grain upon impact (Chung et al., 2016). Another common system is to measure the time that a laser beam is totally or partially blocked by the grain cluster displaced by an elevator. In addition to harvested fruit measurements, there must be a real-time association with the geographic coordinates where harvesting occurs, which make it possible to obtain a yield map. To this end, it is necessary to have a GNSS (global navigation satellite system) installed on the harvester, synchronized to the weighing system (Longchamps et al., 2019). With further processing through GIS (geographical information system) software, it is possible to create harvest maps on a cartographic basis, thus providing valuable information on production and facilitating decision-making based on such data (Zagórda and Walczykova, 2018).

The method of measuring harvested fruit using load cells is quite widespread. The advantage of using such force measurement sensors is that they allow direct measurement, and do not require the use of correlations, which can introduce errors. However, they also have some disadvantages. On the one hand, to achieve accurate measurements their installation is usually complex and expensive. On the other hand, their use in a dynamic environment can lead to problems of accuracy and noise in the recorded signal due to irregular orography, fruit movement, and the accelerations/decelerations experienced by the machines during operation. These factors can produce an average percentage error over 9 % with high flow rates of fruit (Maja and Ehsani, 2010). These problems mean that the use of load cells for this purpose should be studied with great care. Alternative technologies to load cell weighing for yield determination are under study.

An alternative to the direct weighing of harvested fruit in different parts of the machine is to estimate the fruit collected by measuring harvested volume. This estimation is possible because harvesters usually incorporate storage units where fruit is loaded, which may be palletizable, for instance big boxes/bins, or flexible, such as sacks or big bags. It is possible to measure the increase in volume of these storage units while they are being filled employing distance measuring sensors for this purpose (Price et al., 2017). One of the technologies that is widely implemented in precision agriculture techniques is laser imaging detection and ranging (LiDAR), which operates based on time-of-flight (ToF) technology. This technology performs non-contact distance measurement by means of a rotating laser that emits a light beam and calculates the time it takes for the emitted beam to be reflected by an object in order to make a distance conversion. Thanks to their high accuracy, LiDARs are commonly used in field applications, installed on drones to scan the environment (Christiansen et al., 2017), on board machinery to estimate crop yield (Gené-Mola et al., 2020) or inside harvesters over the conveyor belt (Jadhav et al., 2014). However, this is a high-cost technology that requires a powerful real-time data processing system. Another technology that can perform a similar function to LiDAR for volume measurement is 3D cameras, also based on the ToF measurement technique. A 3D camera measures the distance between the camera and the object and captures this information as an image with a certain resolution. These sensors are used in various applications for fruit detection (Gongal et al., 2015), volume measurement (Fu et al., 2020) and crop estimation with good accuracy (Roy et al., 2019). The use of 3D cameras, with a much lower cost compared to LiDAR technology, could

therefore be of interest to estimate the amount of harvested fruit based on its stored volume, however, to date no studies have reported use of this approach.

Weight estimation by volume could be useful for crops such as olives, citrus, nuts, or others that can be harvested mechanically and stored during the operation (Ravetti, 2014, Ye et al., 2017). In the case of olive groves, various harvesters are under development (Sola-Guirado et al., 2020) and other commercial harvesters exist (Sola-Guirado et al., 2019) but there are no models that incorporate a yield monitor. The main problem resides in determining what technology is the most suitable. In this work we take the practical case of olive harvesting and loading into big boxes where a weighing system based on ToF technology will be installed. The aim is to evaluate the feasibility of this system for continuous harvest estimation by means of fruit volume measurement compared to direct weighing. For this purpose, we compared an experimental system composed of a 2D array of low-cost ToF sensors and a commercial system based on a 3D camera with a traditional weighing system based on load cells. The new systems studied could constitute an advance in weighing systems as an alternative to existing ones, without dependence on complex fruit estimation algorithms. The results obtained could be applied to other storage systems such as containers.

2. Materials and methods

2.1. Fruit storage structure

A standard big box measuring 1100 × 900 × 630 mm was used to store the harvested fruit, which allows palletizing and easy handling by trailers or forklifts. To estimate the volume of fruit stored, two distance measuring systems, one commercial (described in Section 2.2.1) and the other experimental (described in Section 2.2.2), were placed on top of the box. Several auxiliary control and measurement elements such as luxmeter or GPS, detailed in Section 2.4, were also installed to evaluate the performance of the different technologies used for the harvest monitor (described in Section 2.3) (Fig. 1). All sensors were mounted on a structure hitched to the rear three-point linkage of a tractor and powered by the tractor battery for testing under real harvesting conditions.

2.2. Estimating harvested fruit volume

2.2.1. Commercial system for distance measurement

The commercial system used in this work for distance measurement is a 3D camera that consists of two main elements, an 840 nm infrared light source (O3M950, IFM electronic, Germany) and a receiver sensor (O3M151, IFM electronic, Germany). The illumination source consisted of an array of 1024 infrared emitters (array of 64 × 16) that emit short duration pulses to illuminate the scene. The sensor captures the reflections of these pulses and transforms them to distance using the time-of-flight (ToF) measurement method. According to the manufacturer's datasheet, the sensor has a measurement range of 0.2–60 m depending on the reflectivity of the target material, an error of 1 cm/m measured, and a Field of View (FoV) of 70° in the x-axis and 23° in the y-axis. The measurements obtained by the sensor correspond to the x, y, and z coordinates of the point in space where each of the lasers impacts with respect to the sensor, as well as the amplitude or intensity of the lasers. Due to the asymmetry of the FoV, the sensor and light source were installed on the structure at a height of 3 m to cover the entire big box, in a centered position with respect to its bottom and perpendicular to it (Fig. 2). In this position the number of useful emitters or pixels was 350 (array of 25 × 14).

2.2.2. Experimental system for distance measurement

The experimental system developed consists of an array of several low-cost ToF sensors (VL53L1X, ST Microelectronics, Switzerland). We selected these sensors for their low cost and suitable characteristics in



Fig. 1. Structure of the commercial system mounted on the tractor for installation of the measuring systems and auxiliary elements. 1.-Luxmeter, 2.-Big box, 3.- Accelerometer, 4.-Microcontroller, 5.-GPS, 6.- Load cell.



Fig. 2. Yield monitor prototype developed with the commercial system over a metallic structure and a big box for the stored fruit (left). Detail of the 3D camera (right).



Fig. 3. Yield monitor prototype developed with the experimental system over a metallic structure and a big box for the stored fruit (left). Detail of the ToF sensor array (right).

terms of range and accuracy. Each sensor consists of an emitter with a wavelength of 940 nm and an independent receiver, allowing distance measurements up to 4 m with a conical field of view of 27° . To cover the volume of the complete storage system, we employed a 2D array arrangement of 12 sensors (3x4). These sensors were installed 200 mm apart and positioned perpendicular to the big box at a height of 1700 mm from the bottom of the box. Due to the high sensitivity of the sensors to external illumination, the structure was covered with a tarpaulin (Fig. 3).

2.3. Auxiliary elements

In the case of the experimental system, each sensor was connected to an Arduino microcontroller (Arduino Nano v3, Smart Projects, Italy) that read the distance values with a refresh rate of 500 ms and sent them to a controller area network (CAN) in a CAN message, for which a CAN module (MCP2515, Microchip, USA) was used. Each CAN message consisted of an identifier that corresponded to a unique sensor and the distance value. The messages were received by a microcontroller (ESP32, Espressif, China) that sent them to a PC via the Ethernet port

used in the algorithms.

Both the commercial and experimental systems also share other auxiliary elements such as a load cell weighing system. The load cell system provides a reliable measurement in static tests for comparison with the measurements of the systems developed in this work. On the other hand, in dynamic tests, it allows verification of the difference between the load cells and the ToF systems studied. The weighing system was a scale (PCE-SW 1500 N, PCE Instruments, Spain) formed of load cells with a maximum weighing range of 1500 kg. Other elements employed, such as an amplifier for load cells, an accelerometer, luxmeters and GPS, also had their respective Arduino microcontrollers and connection to the CAN network. An amplifier module (HX711, SparkFun Electronics, United States) with serial communication via the I2C (Inter-Integrated Circuit) bus was used to amplify and read the measurements. The accelerometer was an independent 3-axis capacitive accelerometer (ADXL345, Adafruit, New York) with a measurement range adjusted to ± 2 g and communication via I2C. The luxmeter (BH1750, Adafruit, New York) had a maximum measurement range of 100000 lx and I2C communication. The GPS (Neo-6 M, Ublox, Switzerland) for

georeferencing the weighing system had a location accuracy of 2.5 m, 0.1 m/s in obtaining velocity and 0.5° in orientation. Communication was via UART (universal asynchronous receiver-transmitter), and the satellite parameters of latitude, longitude, altitude and speed were obtained with the NMEA (National Marine Electronics Association) protocol. Finally, all parameters and measurements received by the CAN receiver are uploaded to the software application developed (described in section 2.4) by means of Wi-Fi connectivity.

2.4. Estimating weight from measured volume

A software application was developed in Microsoft.NET to perform volume estimation, V, according to two algorithms explained below, which are different for each system. To accomplish the estimation, it is necessary to enter the number of measurements or pixels to be used by each algorithm. In the case of the commercial sensor, this was 25x14 pixels (350 measurements) and in the case of the experimental one it was 3x4 sensors (12 measurements), as previously explained. Each of these pixels records an instantaneous distance value. The application interface allows manual input of the harvested fruit density parameter, ρ, to estimate the calculated weight as the product of the instantaneous volume and density. Section 2.6.6 explains the determination of this parameter.

2.4.1. Algorithm for the experimental system

Since we have a reduced number of measurements (3x4) for calculation of the volume, an approximation was made by means of a polynomial interpolation with the known points (Fig. 4 - step 1). These points have the Cartesian coordinates of the position of the sensors with respect to the longitudinal and transverse sides of the big box; their height being the difference between the distance measurements of the sensors and their height with respect to the bottom of the big box. To achieve the approximation, we first perform the calculation of three third-degree polynomials P(x_i) (one for each row of sensors) passing through the four known points in the longitudinal direction (i). Then, for greater precision, n equidistant divisions are made in a longitudinal direction, obtaining n auxiliary points in the polynomial. In this case, 10 mm intervals were used, resulting in 110 auxiliary points (h_{ij}). Next, the same procedure was performed in the transversal direction (j) of the big box. In this case, as previously, 110 auxiliary points per row were calculated, and in the transversal direction there were 3 distance measurements, making it necessary to calculate 110 s-degree polynomials Q(x_j). Then, divisions are made again in the transverse direction of the big box every 10 mm and, substituting in the polynomials, another n auxiliary points (h_{ij}) are obtained, which in this case are 90. This resulted in a mesh of interpolated distances (9900), based on the measurements made by the 12 sensors (Fig. 4 - step 2). The calculation of the

instantaneous volume, V, is the sum of the volumes of the prisms formed by each point, where the area (x·y) is the area of the divisions/intervals (10x10 mm²) and the height of each one is the distance measurement of each of the calculated points (h_i, h_j) (1).

$$V = \sum_{n=1}^{9900} [(x \cdot y) \cdot (h_{ij})] \tag{1}$$

2.4.2. Algorithm for the commercial system

For this system the volume calculation methodology is similar to that shown in Fig. 4-2. In this case no auxiliary points were required and instead the pixel measurements of the 3D camera were used directly. The instantaneous volume, V, was the sum of the volumes of the prisms formed by each pixel (2) (Fig. 4). Each prism has an area (x·y) that is the quotient between the dimensions of the big box on each axis (1100 and 900) and the number of pixels used for each one (25 and 14). Therefore, the area is a fixed value. The height of each prism is the difference between the respective distances measured by each pixel to the area where the fruit exists, h_n and the height, h, of the 3D camera with respect to the bottom of the big box. The height h is a fixed value.

$$V = \sum_{n=1}^{350} [(x \cdot y) \cdot (h - h_n)] \tag{2}$$

2.5. Test for characterization and evaluation of distance measurement

2.5.1. Obtaining the field of view (FoV) of both systems

FoV was experimentally calculated because the manufacturer's datasheet value was obtained under specific test conditions and, in practice, limits are usually lower. In addition, this parameter was critical as it can influence measurement of the big box walls. The sensors that integrate the array of the experimental system and the 3D camera of the commercial system were installed on a tripod and placed perpendicular to a smooth white wall (L* = 95.17, a* = -0.12, b* = 0.55) to determine the field of view. Subsequently, we introduced a 100x100x50 mm square object of a known color (L* = 94.23, a* = 0.09, b* = 0.97) into the field of view. The points recorded for determination of the cone were recorded after detection of variations in the measurements taken by each system compared to the measurements in the absence of the object. This test was performed at different distances from the wall within a range of 50–250 cm for the experimental system and 50–350 cm for the commercial system. The mean illumination recorded was 121.43 ± 10.86 lx in both cases.

2.5.2. Obtaining accuracy and repeatability for both systems (distance and volume)

To determine the accuracy of the distance measured by the sensors,

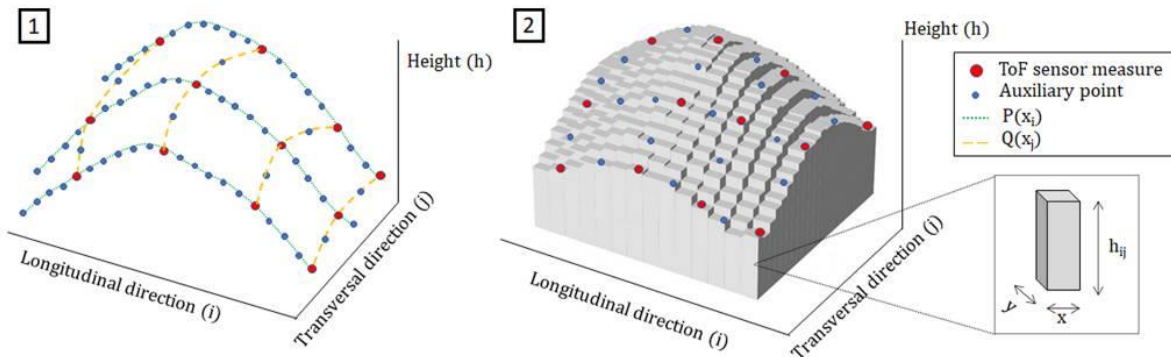


Fig. 4. Algorithm implemented for volume calculation in the experimental system. Not all auxiliary points and polynomials calculated have been represented. Step 1 corresponds to the calculation of the polynomials on both axes to generate the auxiliary points. Step 2 represents the prisms for each point (sensor and auxiliary measurements) for the calculation of the total volume.

both systems were placed on a tripod perfectly parallel to a smooth white wall ($L^*=95.17$, $a^*=-0.12$, $b^*=0.55$). The measurements registered with the sensors were compared with those obtained using a laser distance meter (GLM50, Bosch, Germany). In the case of the commercial system, each of the 1024 pixels were recorded and plotted to check variability of the measurements from the center to the edges of the FoV. Subsequently, distance measurements were taken in an interval from 50 to 250 cm and 50–350 cm between the target and the sensor for the experimental and the commercial system, respectively. The average illumination level recorded during the test for both systems was 121.25 ± 10.07 lx.

To determine the algorithm's accuracy in calculating volume, both systems were tested using a uniform white ($L^*=91.75$, $a^*=-0.88$, $b^*=3.49$) filling surface. This was raised in 5 cm increments until complete filling, and the actual volume was progressively calculated by the algorithm. The experimental system was tested with the measurement area fully covered and the commercial system with the area uncovered.

2.5.3. Influence of the intercepted surface area on measurement accuracy (experimental system only)

For the experimental system, we conducted a test of the influence of the area to be measured on the precision of measurements obtained since there was a 2D array of 12 sensors, for each of which the volume captured by the cone varies as the storage system is filled. For this purpose, the sensor was placed in front of a smooth wall at a distance of 240 cm, with 11 concentric, 6 cm-thick disks of different radii (10–60 cm) in front of the sensor. The disks fit inside each other, and their centers align with that of the sensor (Fig. 9). With all the disks fitted together, the diameter of the circle formed coincides with the cone aperture at the given distance. Measurements were made by increasing the number of circles (variation of the captured surface) from the center outwards and in reverse sequence, checking the accuracy of the distance measurements obtained.

2.5.4. Influence of the color and reflectivity of the measured surface on measurement accuracy

Different cardboard targets (white, black and green) with different surface finishes (matte or gloss) were placed at a fixed height of 100 cm above the storage system (Table 1). Measurements were then taken at a fixed, known distance common to all targets in order to evaluate the influence on the accuracy of measurement under similar illumination conditions (1166.67 ± 34.96 lx). The test was performed with both systems.

2.5.5. Influence of ambient illumination on measurement accuracy.

The two systems were placed outdoors, on two different days (one day per system), starting with night conditions (0 lx) and ending under daytime conditions around 40 klx. The measurements were recorded at 30 s intervals, taking the measurements of both systems with empty storage as the reference, in order to check the influence of the variation in illumination levels on them. For the experimental system, two luxmeters were used, one located on the outside, oriented upwards, without encapsulation, to check external illumination without attenuations, and another in the internal part of the center of the sensor array with the

same encapsulation as the sensors to verify the illumination received under these conditions.

2.5.6. Obtaining error estimation for weight and the influence of the filling zone.

The big box was discontinuously filled with 5.36 ± 0.53 kg batches of fruit using small boxes. This step was completed in the same way for the commercial and experimental systems. For each measurement, the accumulated weight was determined by direct measurement with the load cell-based system, as well as weight estimation using the developed algorithms. In each of the two measurement systems, we tested three filling configurations of the big box: from the center (CE), from the corner (CO) and from the side (SI), with two replicates each. These three filling configurations were mainly used to test the experimental system. The sensors close to the big box walls were installed in such a way that their cone did not interfere with the walls so as not to give erroneous measurements. In the case of the 3D camera, this problem is avoided by limiting the FoV and selecting specific pixels. This error estimation test was conducted with 'Manzanilla' variety olives harvested in November during the harvesting season. For the test, it was necessary to determine the density of the batches of olives, for which we weighed the volume of water displaced by 10 samples of 5 kg of fruit, determining a density of 655 kg/m^3 .

2.5.7. System performance with changing accelerations

The yield monitor with all the necessary instrumentation was installed on a crawler tractor (TK4, New Holland, USA) to evaluate the influence of vibration and load movement on weight estimation during off-road transit in a plot. In order to do this, the big box was filled with a 243 kg load of olives measured by the scale used in static conditions. Later the tractor traveled on an irregular terrain for ~ 300 m at an appropriate speed for a tractor during field operations ($2.70 \pm 1.46 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$). The weight was measured directly with the load cells and estimated with both the commercial and the experimental systems at the same time intervals and under similar lighting conditions with high light intensity (31603.39 ± 12554.95 lx). Other parameters (date and time, accelerations, GPS positioning, and intensity of exterior and interior lighting) were also recorded. Finally, a map with the variation of the relative weight error of each system was obtained using ArcGIS Pro software and the IDW (Inverse Distance Weighting) interpolation technique.

3. Results

3.1. Obtaining the field of view of both systems

The cone measured for the sensors of the experimental system was, individually, 15° in the x-axis and 14.4° in the y-axis, and was very symmetrical on both sides of the axes and very close to the 15° indicated in the manufacturer's data sheet. For the commercial system, the cone obtained was 64.77° in the x-axis and 19.98° in the y-axis, slightly lower than the manufacturer's specification (70° in the x-axis and 23° in the y-axis) (Fig. 5). All points plotted for the cone calculation are the result of the average of two measurements.

3.2. Obtaining the accuracy and repeatability of both systems (distance and volume)

For the commercial system, the results obtained by measuring over the wall showed a heterogeneous distribution of relative error throughout the field of view and at different distances, becoming less uniform the closer the 3D camera was placed to the wall (Fig. 6). The mean relative error ranged from $2.35 \pm 2.02 \%$ at 175 cm to $4.52 \pm 1.99 \%$ at 350 cm, with high repeatability. It should be noted that the largest error was observed in the pixels at the corners and ends of the sensor FoV, although these were not used in this work due to the big box

Table 1
Coordinates in the CIELAB color space for the targets used.

Target	L^*	a^*	b^*
Bright black	27.21	2.10	-1.96
Matte black	26.51	0.33	1.05
Bright white	83.40	-0.44	-0.87
Matte white	93.02	0.63	-2.09
Bright green	57.45	-41.85	30.77
Matte green	51.79	-37.68	16.04

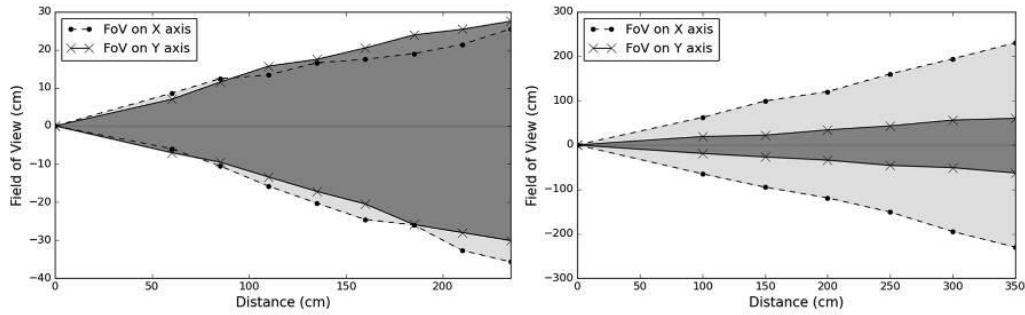


Fig. 5. Field of view for the experimental system (left) and commercial system (right). XY Coordinates origin correspond to the position of the sensor for each system.

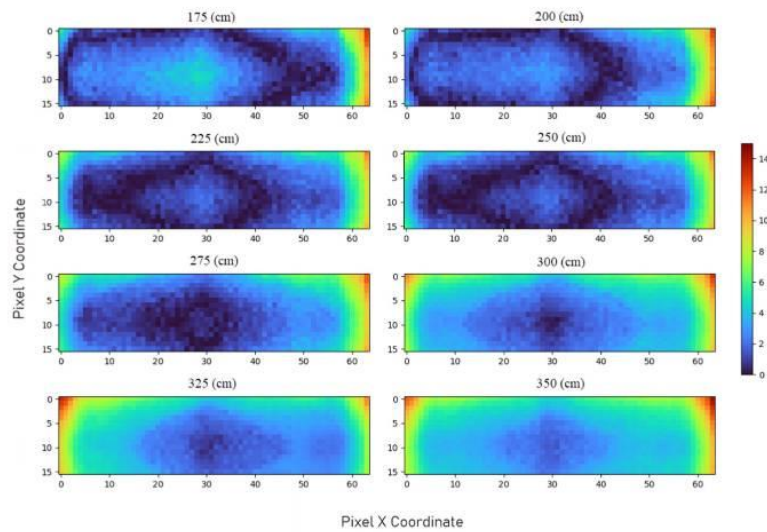


Fig. 6. Relative error (%) in distance for the commercial system at different positions from a wall before the corrections of the 3D camera.. Each pixel corresponds to a measurement in the FoV of the 3D camera (1024 pixels).

measurements. Thus, in the FoV of the 3D camera the big box occupies from the pixel with the coordinates (19,1) to (41,14), leaving the rest of the measurements unused. However, the high relative error obtained made it necessary to implement a regression per pixel to improve accuracy. After implementation of the corrections, the results improved considerably, giving a relative mean distance error from the wall surface of $1.18 \pm 1.31 \%$ and $0.95 \pm 1.48 \%$, in the intervals 175 and 350 cm respectively (Fig. 7, right). In the working range of the case study with

the box filling height, a mean relative error of $0.51 \pm 0.34 \%$ was obtained for a height of 240 cm and $0.75 \pm 0.84 \%$, for the 300 cm height. The mean absolute error in the working range was 1.52 ± 1.66 cm.

For the experimental system, the mean relative error in distance was always below 2.5 %, which decreased as the distance to the target increased until a minimum of 0.5 % error was obtained at 225 cm (Fig. 7, left). Within the working range of the case study in the measurement of the big box (100–170 cm), the mean relative error was between 0.66 and

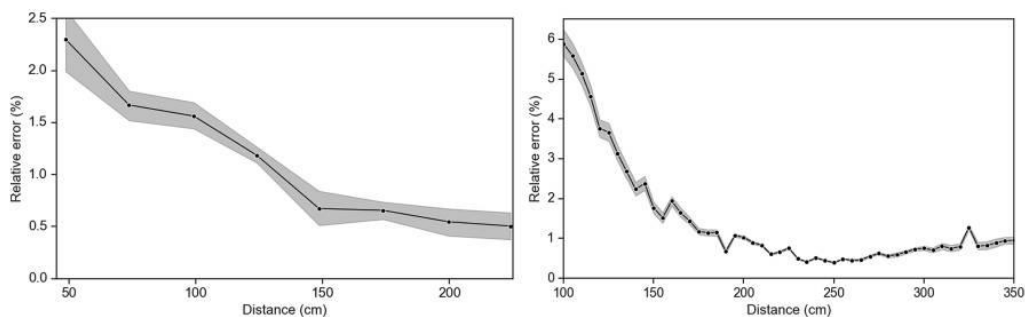


Fig. 7. Relative error in distance at different positions from a wall for the experimental system (left) and for the commercial system with corrections (right). Gray band delimits the uncertainty bounds due to the 10 measures.

1.56 %. For the calculation of mean relative error, we used the mean of 10 measurements taken in the working range, and thus obtained 97.65 ± 0.22 cm and 172.66 ± 0.250 cm for the lower and upper extremes of this range. The mean absolute error in the working range was 12.83 ± 2.22 cm.

In the calculation of volume, with the box and procedure described above, the mean relative error obtained was 1.65 ± 0.86 % and 5.40 ± 3.97 % for the experimental system and the commercial systems, respectively (Fig. 8).

3.3. Influence of the intercepted surface area on measurement accuracy (experimental system only)

For the experimental system, it was found that a progressive increase in the area to be measured also led to an increase in the accuracy of the measurements. Fig. 9 shows how the accuracy of the sensor varies as area increases (smaller to larger circles as imaged progressively outward and vice versa). Initially, a very high relative error of around 50 % was observed from the center outward, due to a very low value of the circle area (78.5 cm^2) compared to the outside-in direction, whose circle has a larger area (434.3 cm^2) and gave a relative error below 40 %. We also observed that, at some points, different relative errors were obtained at equal accumulative areas, suggesting that the position of the circles with respect to the cone influences the accuracy obtained. It was observed that as the accumulated areas equalize, the errors also approach equality (0.37 % and 0.24 %, respectively) when the circle was complete in the two sequences tested.

3.4. Influence of the color and reflectivity of the measured surface on measurement accuracy

The results obtained show that the average relative error obtained with targets whose surface finish was glossy was always higher, around 7.84 ± 6.02 % for the commercial system and 3.29 ± 0.08 % for the experimental system, than in the case of matte targets, 4.03 ± 2.20 % and 1.44 ± 0.21 %, respectively. By color, it was observed that the maximum relative error occurred with the glossy black target and the commercial system (8.29 ± 2.73 %) and the minimum mean relative error with the matte green target for the experimental system (1.25 %) (Fig. 10).

3.5. Influence of ambient illumination on measurement accuracy

Fig. 11 shows the variation in absolute error with varying illumination levels for both measurement systems. In the experimental system, we observed a progressive increase in the mean absolute error as the ambient illumination increases, reaching almost 0.3 m^3 with an illumination of approximately 130 lx. In the commercial system, the absolute variation in volume was recorded directly due to the large amount

of information that would be required to record the measurements of each pixel over time. In this case, we observed a greater dispersion of measurements from 3000 lx and, above all, from approximately 10000 lx.

3.6. Obtaining weight estimation error and the influence of the filling zone

The absolute error incurred by the experimental and commercial systems in the three filling configurations of the storage system can be seen in Fig. 12. For the experimental system with 156 kg of real weight, a mean absolute error of 28.26 ± 10.48 kg was obtained by filling the fruit through the center versus 19.15 ± 4.26 kg and 5.42 ± 3.44 kg when filling through the corner and side, respectively. Within each filling test, we observed high repeatability in weight estimation for all three configurations. In the experimental system, measurements from the center overestimate weight, whereas those from the corner underestimate it, and filling measurements from the side are more in line with the real instantaneous weight. However, in the commercial system all filling configurations are very similar and slightly underestimate the actual instantaneous weight. For the commercial system, with 156 kg of real weight, all three configurations have a lower mean absolute error than the experimental system. Mean absolute errors of 13.45 ± 5.34 kg, 11.07 ± 5.60 kg and 11.86 ± 5.40 kg were obtained for the center (CE), corner (CO) and side (SI) configurations, respectively.

3.7. Obtaining the estimated weight error with changes of acceleration during transit on an irregular road

In the dynamic test performed during accelerations, the RMS (Root Mean Square) registered in the yield monitor varied considerably over time and along the path (Fig. 13).

Regarding estimated weight, for both the experimental system and commercial system tests, we also observed continuous oscillations in the data recorded by the load cells around the real weight line (Fig. 14). In general, the weight estimated and relative error by the experimental system did present oscillations (215.55 ± 6.90 kg, 11.3 ± 2.83 %) but remained more stable than the load cells (242.86 ± 29.15 kg, 6.26 ± 10.23 %), with which a minimum of -28 kg and a maximum of 511 kg were measured. The estimated weight was below the actual weight line (243 kg), which was an underestimate of the weight of the transported cargo. In contrast, the commercial system also showed some oscillations (278.78 ± 6.76 kg, 16.72 ± 3.16 %) although, again, it was more stable than the load cells (236.79 ± 17.68 kg, 5.5 ± 6.81 %), with a minimum of 95.5 kg and a maximum of 364 kg. In this case, the weight estimated by the commercial system was always above the actual weight line, overestimating the load. Fig. 15 shows a color map of the relative error along the traveled path. Both distance measurement technologies generate a much more homogeneous error map than the one obtained with conventional weighing technology, which was much more

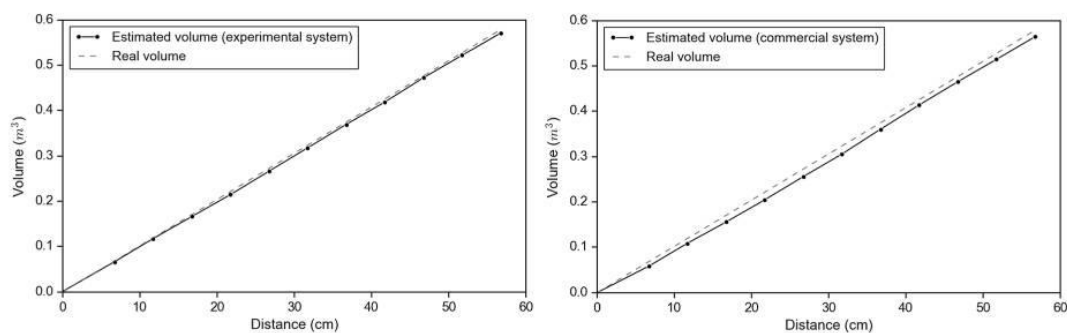


Fig. 8. Real volume vs estimated volume in the bigbox for the experimental system (left) and commercial system (right). Each point corresponds to the volume measurement made with each increase in height of the surface used.

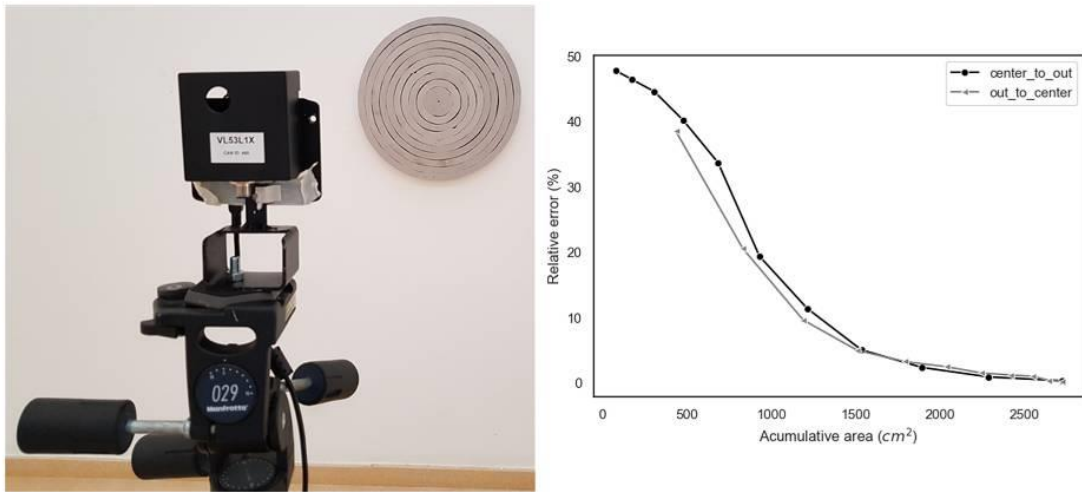


Fig. 9. Relative error in distance (right) with different area surfaces intercepted by the FoV of one ToF sensor (left). The accumulative area corresponds to the layout of the different circles.

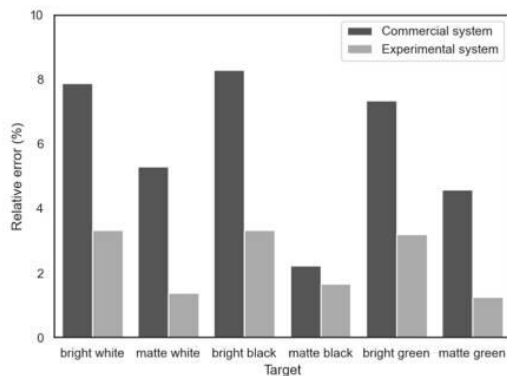


Fig. 10. Relative errors in distance measured using the experimental and commercial systems for different color (bright and matte) targets.

variable.

4. Discussion

The field of view measurement experiment provided results very

close to those indicated in the data sheets of both systems. The deviations or errors produced may be systematic due to internal factors of the sensors themselves, or non-systematic due to external factors due to the environment and/or the different test conditions such as ambient lighting, nature of the target, etc. (Hansard et al., 2013). The 2D array layout in 3x4 configuration used for the experimental system and the dimensions of the big box imply overlapping of the FoVs of the sensors due to their position and field of view. However, such an arrangement was selected to fit the rectangular geometry of the storage system, and the spatial distribution of the sensors was necessary to avoid introducing errors in measurement due to the walls of the big box. The overlapping of the FoVs of the different sensors does not influence their individual measurements, and the introduction of a larger number would improve the estimates obtained, reducing the calculated auxiliary points. For the commercial system, the inequality between the FoV of the X and Y axes forced us to raise the installation height of the sensor with respect to the experimental system, so as to adapt it to the width of the big box. This also implies disregarding a large amount of the 3D camera's available pixels as they impact outside the storage system. A commercial system with an FoV more adapted to the geometry of the big box would allow fewer pixels to be neglected, improving the accuracy of the weight estimation. For both measurement systems, it was essential to fix the position of the storage system during dynamic operation since

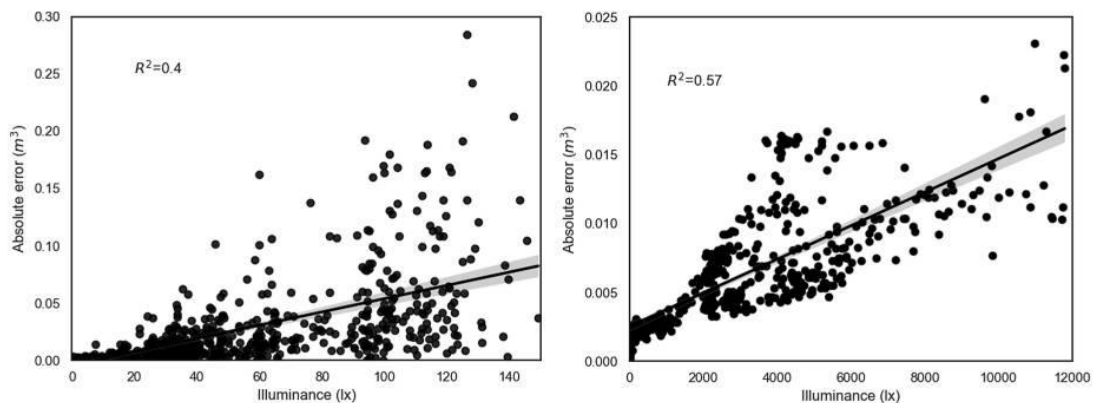


Fig. 11. Absolute error in volume with different illumination levels for the experimental system (left) and the commercial system (right). Black line indicates the linear correlation.

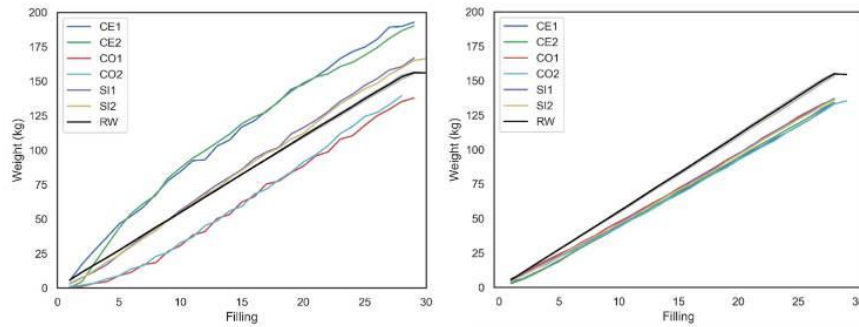


Fig. 12. Estimated weight for two repetitions (1,2) by center (CE), corner (CO) or lateral (SI) filling for the experimental system (left) and commercial system (right). Black line indicates the real weight (RW). The gray band around the real weight line delimits the uncertainty bounds due to the different repetitions.

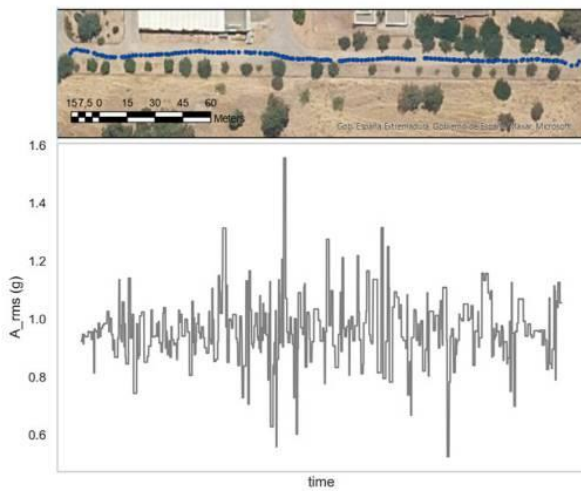


Fig. 13. GPS route registered by a tractor with the systems on an off-road transit (up) and RMS acceleration measured during the test (down).

displacement or rotation would entail the need to recalibrate both systems due to the change in the relative position of the big box inside the FoV.

The accuracy test for both systems was carried out considering two criteria. On the one hand, an evaluation of sensor accuracy on the measurement of distance and, on the other hand, the accuracy of the algorithm for calculating the volume occupied in the storage system. For the experimental system, a low average relative error was obtained for

distance measurement within the working range, which also followed a descending line, with error decreasing as the distance to the wall increased. For the commercial system, high relative errors were measured with a progressive increase from the center of the sensor FoV towards the ends, with maximum errors generally obtained at the corners (Jung et al., 2015). These errors were reduced by the regressions applied per pixel and we observed, as for the experimental system, how mean relative error decreased as the distance to the wall increased up to a minimum value, from which it started to rise again (Lindner et al., 2010). However, the measurement distance range was the lowest relative error range, and practically coincided with the optimal distance range for volume calculation when the big box was full and empty, thus also justifying the installation height of the commercial system.

The volume calculation algorithm for the experimental and commercial systems performed similarly to the actual volume evolution for filling the storage system using a flat surface. In this case the commercial system had a lower accuracy due to two factors. On the one hand, the higher number of measurements involved in the volume calculation (350 versus 12) and on the other hand, the variability in the pixel measurements from the center of the FoV to the ends. In addition, as the filling was flat and the accuracy in distance was higher for the experimental system, the auxiliary points estimated for this system are located on the straight line joining the real measurement points, contributing to the stability of the error and, therefore, to a better approximation to the real value. There are other factors inherent to the technology used such as temperature, integration time or modulation frequency of the infrared wave that can affect the accuracy (Fursattel et al., 2016), although our work does not consider them.

The illumination level factor affected the two systems differently. The experimental system has a configuration mode called 'Short' that increases the immunity to ambient light, although it was necessary to configure it in 'Medium' mode to obtain a measurement range according

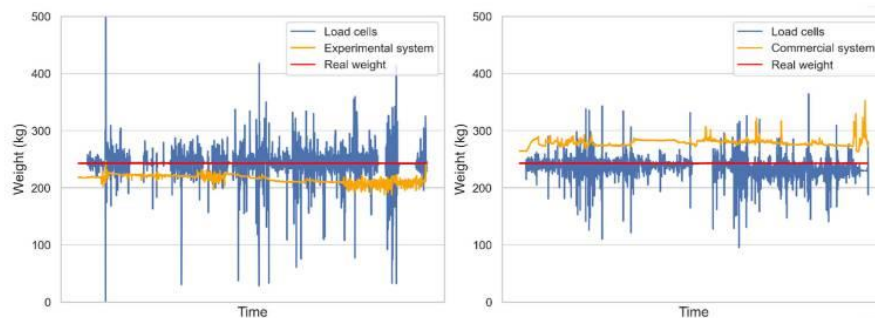


Fig. 14. Estimated weight (orange line) for experimental system (left) and commercial system (right). Red line and blue line indicate the actual weight transported and blue line the weight measures by load cells, respectively. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.) (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)



Fig. 15. Variation in weight relative error considering the load transported during the dynamic test for different systems.

to installation height. In addition, it was necessary to cover the measurement area due to the instability observed in the measurements. The incidence of direct light makes this system totally unfeasible if uncovered. In contrast, the commercial system was practically insensitive to light and was able to operate under real lighting conditions without any attenuation measures. Both systems operate at different wavelengths and modes of operation, 840 nm in modulated light for the commercial system and 940 nm in pulsed light for the experimental one, which may influence their performance under different illumination conditions (Illade-Quinteiro et al., 2015). Other factors such as pulse modulation frequency (Jongenelen et al., 2011) and the application of filters for external light removal (Tobias et al., 2005) also affect the accuracy of similar optical systems. The need to cover the measurement area, protecting it from light, makes the experimental system more suitable for machines with covered fruit accumulation hoppers and a side or corner filling system, so as not to interfere with the light pulses emitted by the sensors. The commercial system presents more versatility for practical application and can even be adjusted for the measurement of fruit flow on a conveyor belt combined with a conveyor belt speed sensor, as is done in other sectors such as viticulture (Taylor et al., 2016).

Tests on the influence of color and surface finish on measurement reveal that they are important factors to consider in weight estimation using optical systems (Lakovic et al., 2019) (Dashpute et al., 2019). Gloss-finished surfaces give higher error in both systems compared to matte-finished surfaces due to the change in reflectivity. For the commercial system the average relative error with any color and surface finish was always higher than for the experimental one, justified in part by the higher number of measurements recorded and their variability from the center to the ends of the FoV. In the practical application of both systems, it is necessary to study the characteristics of the fruit to be harvested, in terms of color and reflectivity, and external conditions that can alter the intrinsic characteristics of the fruit, such as rain or dust.

Static weight estimation using different filling zones reported different results depending on the system evaluated. For the experimental system, filling from the side of the box was the most accurate, whereas filling from the center or corner overestimated and underestimated the weight, respectively. The high errors relative to the start of filling from any part of the storage system are due to the influence of the measured surface area in relation to the opening width of the sensor cone, as seen in the test performed to study this factor (Fig. 7). This also explains why center filling was the least accurate. The practical application of one location or the other will depend on which better adapts to the characteristics of the storage system and the fruit's entry into it. It would also involve application of a certain offset value depending on filling location to adjust the estimated weight more accurately to the actual weight. On the other hand, for the commercial system, the filling location was practically indifferent, with the errors made by the different filling locations equalizing when the storage system reached around 20 % of its capacity. When filling started, the accuracy of this system was higher than the experimental system due to the use of

numerous pixel measurements instead of a small number of sensors with the associated problem of surface area with respect to the cone opening. However, as filling proceeded, the estimated weight increasingly diverged from the actual weight for any given filling location, so it would be advisable to test this system with other storage geometries or larger volumes.

During the dynamic test, the oscillations observed in the commercial system are due to full exposure to sunlight and follow a similar evolution to the oscillations of the illumination level measured. In the experimental system, despite being covered, very low levels of illumination were detected, which were, however, sufficient to affect the measurements taken. It should also be noted that in this test there were larger average relative error differences (11.3 % for the experimental system and 14.7 % for the commercial system) than those detected in the static filling test, since the fruit was distributed in a more homogeneous way in the big box due to oscillations during movement and the variability of illumination. The parts of the estimated weight signal with the highest variability coincide with the highest illumination levels detected. However, both systems performed better than load cells, which are very sensitive to accelerations (Maja and Ehsani, 2010) and must be corrected by mechanical shock absorbers or signal filtering.

The static and dynamic tests performed for both systems confirm the need to apply an offset to adjust the estimated to the real weight. This offset value was estimated at approximately + 28 kg for application to the experimental system and -23 kg for the commercial one. On the other hand, actions can be carried out for distance calibration (Fuchs and Hirzinger, 2008), correction by various methods (He et al., 2017) and accuracy improvement (Jongenelen et al., 2010). It is true that performing the measurement indirectly leads to a loss of accuracy in weight calculation, but problems arising from accelerations can be reduced or eliminated without the need for a complex signal filtering process. In addition, the mechanical and design problems that arise for load cell installations in dynamic systems can be avoided. On the other hand, the accuracy of the experimental system can improve by the calculation of more auxiliary points since, the higher the number of points estimated, the closer the curve obtained will be to reality. For their practical application, the accuracy of the evaluated systems could be improved by applying a correction of the fruit density value, instead of using a fixed value, because as the harvest season progresses this value varies due to the increase in fruit size during ripening (Nasini and Proietti, 2014). For this purpose, a progressive measurement of fruit density can be made, and the value can be updated in the algorithm for self-adjustment.

Finally, comparing the cost of both systems, we find that the experimental system presents a cost approximately-five times lower than the commercial system. The cost of the load cells system would be an intermediate cost between the two alternatives developed. Clearly, once the commercial production phase is reached, the real costs would need modification to include the costs of development, the insertion of other components, in addition to industrial profit. Future work should

be directed towards the application of these systems on real harvesters. The dimensions of the machines may limit the placement of the ToF sensors, especially the commercial system, due to the field of view of both. Environmental conditions could also cause serious errors in the ToF systems, especially in the experimental system, if they could not be completely covered. Variations in machine speed as well as varying terrain orography can cause serious deviations of results in the load cells if no proper filtering is done, but could even be damaged by impacts generated by a high load. The type of harvester storage system and its way of filling would require a prior adjustment of the calculated volume estimates. Moreover, the different varieties of fruit harvested should be previously tabulated in terms of density in order to be able to adjust the weight estimation by volume. These and other technical issues should be studied in individual machine cases by working extensively in the field to determine the ultimate technical and economic feasibility of each system and its optimization.

5. Conclusions

Different experiments were conducted to evaluate one experimental low-cost system and another commercial system based on ToF measurements to determine their suitability for weight estimation by calculating the volume occupied by the fruit in a big box. Considering the aspects discussed in this work, both systems studied are suitable for monitoring the volume of fruits such as olives with high accuracy. The results obtained demonstrate that these systems provide a promising alternative for weight estimation compared to load cell-based systems under dynamic conditions.

The FoV of the sensors are quite similar to manufacturer's specifications. A correction of the distance accuracy of the commercial system was applied in order to reduce the mean error distribution along the FoV between 0.51 and 0.75 % within the box size, which gave a volume mean relative error of 5.40 %. The distance mean relative error of the experimental system was between 0.66 and 1.56 % within the box size, with a mean relative error for volume of 1.65 %. The accuracy of the experimental system depends on the area intercepted within the FoV of the sensor. Measurements on objects with matte colors reported less relative error for distance than with bright colors. The accuracy of the commercial system was not greatly affected by illumination whereas the experimental system required a complete cover to isolate it. The filling area of the box influenced the accuracy of weight estimation in the experimental system, whereas the commercial system was not affected. Side filling had the lowest relative error, 3.5 and 7.6 % with the experimental and the commercial systems, respectively with 156 kg. The accuracy of weight estimation could be improved by introducing a real-time calculation of the harvested fruit's density. Both ToF systems reported more stable measurements than the load cells during transit on an irregular road, although they registered an offset error during the test. To implement a system similar to the ones studied in this work in common storage systems or on-board harvesters of different crops, specific studies of the intrinsic working characteristics of these systems should be carried out. Further studies should research the application of such technologies on real machinery and include real-time measurement of fruit density to correct the weight estimation system.

CRedit authorship contribution statement

Sergio Bayano-Tejero: Formal analysis, Software. **Manoj Karkee:** Writing – review & editing. **Antonio Rodríguez-Lizana:** Writing – review & editing. **Rafael R. Sola-Guirado:** Conceptualization, Methodology, Project administration, Supervision, Investigation.

Declaration of Competing Interest

The authors declare the following financial interests/personal relationships which may be considered as potential competing interests:

Rafael R. Sola-Guirado reports financial support was provided by Consejería de Transformación Económica, Industria, Conocimiento y Universidades de la Junta de Andalucía.

Data availability

No data was used for the research described in the article.

Acknowledgements

The authors are grateful for the funding received for the PYC20 RE 024 UCO Project 'Development of an IoT application to monitor the harvest performed by different mechanization systems in traditional olive harvesting for the improvement of its management and traceability' financially supported by the Consejería de Transformación Económica, Industria, Conocimiento and Universidades de la Junta de Andalucía. We would also like to thank Juan Pérez-Moya for the support given in the design of the algorithms.

References

- Bayano-Tejero, S., Sola-Guirado, R.R., Gil-Ribes, J.A., Blanco-Roldán, G.L., 2019. Machine to machine connections for integral management of the olive production. *Comput. Electron. Agric.* 166 <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104980>.
- Chang, Y.K., Zaman, Q., Farooque, A.A., Schumann, A.W., Percival, D.C., 2012. An automated yield monitoring system II for commercial wild blueberry double-head harvester. *Comput. Electron. Agric.* 81, 97–103. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.11.012>.
- Christiansen, M., Laursen, M., Jørgensen, R., Skovsen, S., Gislum, R., 2017. Designing and Testing a UAV Mapping System for Agricultural Field Surveying. *Sensors* 17, 2703. <https://doi.org/10.3390/s17122703>.
- Chung, S.-O., Choi, M.-C., Lee, K.-H., Kim, Y.-J., Hong, S.-J., Li, M., 2016. Sensing Technologies for Grain Crop Yield Monitoring Systems: A Review. *J. Biosyst. Eng.* 41, 408–417. <https://doi.org/10.5307/JBE.2016.41.4.408>.
- Corredo, L.D.P., Canata, T.F., Maldaner, L.F., de Lima, J.D.J.A., Molin, J.P., 2021. Sugarcane Harvester for In-field Data Collection: State of the Art, Its Applicability and Future Perspectives. *Sugar Tech* 23 (1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00874-3>.
- Dashputre, A., Anand, C., Sarkar, M., 2019. Depth Resolution Enhancement in Time-of-Flight Cameras Using Polarization State of the Reflected Light. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 68, 160–168. <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2838819>.
- Fu, L., Gao, F., Wu, J., Li, R., Karkee, M., Zhang, Q., 2020. Application of consumer RGB-D cameras for fruit detection and localization in field: A critical review. *Comput. Electron. Agric.* 177, 105687 <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105687>.
- Fuchs, S., Hirzinger, G., 2008. Extrinsic and depth calibration of ToF-cameras. In: In: 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2008.4587828>.
- Fursattel, P., Placht, S., Balda, M., Schaller, C., Hofmann, H., Maier, A., Riess, C., 2016. A Comparative Error Analysis of Current Time-of-Flight Sensors. *IEEE Trans. Comput. Imaging* 2, 27–41. <https://doi.org/10.1109/TCL.2015.2510506>.
- Gené-Mola, J., Gregorio, E., Auat Cheein, F., Guevara, J., Llorens, J., Sanz-Cortella, R., Escolá, A., Rosell-Polo, J.R., 2020. Fruit detection, yield prediction and canopy geometric characterization using LiDAR with forced air flow. *Comput. Electron. Agric.* 168, 105121 <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105121>.
- Gongal, A., Amatya, S., Karkee, M., Zhang, Q., Lewis, K., 2015. Sensors and systems for fruit detection and localization: A review. *Comput. Electron. Agric.* 116, 8–19. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.021>.
- Hansard, M., Lee, S., Choi, O., Horaud, R., 2013. Time-of-Flight Cameras, SpringerBriefs in Computer Science. Springer London, London. 10.1007/978-1-4471-4658-2.
- He, Y., Liang, B., Zou, Y., He, J., Yang, J., 2017. Depth Errors Analysis and Correction for Time-of-Flight (ToF) Cameras. *Sensors* 17, 92. <https://doi.org/10.3390/s17010092>.
- Illade-Quinteiro, J., Brea, V., López, P., Cabello, D., Doménech-Asensi, G., 2015. Distance Measurement Error in Time-of-Flight Sensors Due to Shot Noise. *Sensors* 15, 4624–4642. <https://doi.org/10.3390/s150304624>.
- Jadhav, U., Khot, L.R., Ehsani, R., Jagdale, V., Schueller, J.K., 2014. Volumetric mass flow sensor for citrus mechanical harvesting machines. *Comput. Electron. Agric.* 101, 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.12.007>.
- Jongeneelen, A.P.P., Carnegie, D.A., Payne, A.D., Dorrington, A.A., 2010. Maximizing precision over extended unambiguous range for TOF range imaging systems. In: 2010 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference Proceedings. IEEE, pp. 1575–1580. <https://doi.org/10.1109/IMTC.2010.5488178>.
- Jongeneelen, A.P.P., Bailey, D.G., Payne, A.D., Dorrington, A.A., Carnegie, D.A., 2011. Analysis of Errors in ToF Range Imaging With Dual-Frequency Modulation. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 60, 1861–1868. <https://doi.org/10.1109/TIM.2010.2089190>.
- Jung, J., Lee, J.-Y., Jeong, Y., Kweon, I.S., 2015. Time-of-Flight Sensor Calibration for a Color and Depth Camera Pair. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 37, 1501–1513. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2014.2363827>.
- Lakovic, N., Brkic, M., Batinic, B., Bajic, J., Rajis, V., Kulundzic, N., 2019. Application of low-cost VL53L0X ToF sensor for robot environment detection. In: In: 2019 18th

- International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH). IEEE, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/INFOTEH.2019.8717779>.
- Lindner, M., Schiller, I., Kolb, A., Koch, R., 2010. Time-of-Flight sensor calibration for accurate range sensing. *Comput. Vis. Image Underst.* 114, 1318–1328. <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2009.11.002>.
- Longchamps, L., Panneton, B., Fountas, S., Khosla, R., 2019. Yield sensing technologies for horticultural crops: a short review. In: *Precision Agriculture '19*. Wageningen Academic Publishers, The Netherlands, pp. 589–595. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-888-9_73.
- Maja, J.M., Ehsani, R., 2010. Development of a yield monitoring system for citrus mechanical harvesting machines. *Precis. Agric.* 11, 475–487. <https://doi.org/10.1007/s11119-009-9141-1>.
- Nasini, L., Proietti, P., 2014. Olive harvesting, in: *The Extra-Virgin Olive Oil Handbook*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, pp. 87–105. 10.1002/9781118460412.ch8.
- Price, R.R., Johnson, R.M., Viator, R.P., 2017. An overhead optical yield monitor for a sugarcane harvester based on two optical distance sensors mounted above the loading elevator. *Applied Engineering in Agriculture* 33 (5), 687–693. <https://doi.org/10.13031/aea.12191>.
- Qian, J., Ruiz-García, L., Fan, B., Robla Villalba, J.I., McCarthy, U., Zhang, B., Yu, Q., Wu, W., 2020. Food traceability system from governmental, corporate, and consumer perspectives in the European Union and China: A comparative review. *Trends Food Sci. Technol.* 99, 402–412. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.025>.
- Ravetti, L.M., 2014. Technology for improving the efficiency of mechanical harvesting in modern olive growing. *Acta Hort.* 1057, 221–229. 10.17660/ActaHortic.2014.1057.26.
- Roy, P., Kislaly, A., Plonski, P.A., Luby, J., Isler, V., 2019. Vision-based preharvest yield mapping for apple orchards. *Comput. Electron. Agric.* 164, 104897 <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104897>.
- Shafi, U., Muntaz, R., García-Nieto, J., Hassan, S.A., Zaidi, S.A.R., Iqbal, N., 2019. Precision Agriculture Techniques and Practices: From Considerations to Applications. *Sensors* 19, 3796. <https://doi.org/10.3390/s19173796>.
- Sola-Guirado, R.R., Aragon-Rodríguez, F., Castro-García, S., Gil-Ribes, J., 2019. The vibration behaviour of hedgerow olive trees in response to mechanical harvesting with straddle harvester. *Biosyst. Eng.* 184, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.06.009>.
- Sola-Guirado, R.R., Castillo-Ruiz, F.J., Blanco-Roldán, G.I., González-Sánchez, E., Castro-García, S., 2020. Mechanical canopy and trunk shaking for the harvesting mechanization of table olive orchards. *Rev. FCA UNCuyo* 52 (2), 124–139.
- Taylor, J.A., Sanchez, L., Sams, B., Haggerty, L., Jakubowski, R., Djafour, S., Bates, T.R., 2016. Evaluation of a commercial grape yield monitor for use mid-season and at-harvest. *OENO One* 50, 57–63. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2016.50.2.784>.
- Taylor, J.A., 2004. Precision Viticulture and Digital Terroir: Investigations into the application of information technology in Australian vineyards. PhD Dissertation. University of Sydney.
- Tobias, M., Holger, K., Jochen, F., Martin, A., Robert, L., 2005. Robust 3D Measurement with PMD Sensors. *Range Imaging Day, Zürich* 7, 8.
- Ye, Y., Wang, Z., Jones, D., He, L., Taylor, M., Hollinger, G., Zhang, Q., 2017. Bin-Dog: A Robotic Platform for Bin Management in Orchards. *Robotics* 6, 12. <https://doi.org/10.3390/robotics602012>.
- Zagórda, M., Walczykova, M., 2018. The application of various software programs for mapping yields in precision agriculture. *BIO Web Conf.* 10, 01018. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20181001018>.

Anexo III

Machine to machine connections for integral management of the olive production

Disponible online en <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104980>

Anexo IV

Cleaning system, batch sorting and traceability between field-industry in the mechanical harvesting of table olives



Contents lists available at ScienceDirect

Postharvest Biology and Technology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/postharvbio

Cleaning system, batch sorting and traceability between field-industry in the mechanical harvesting of table olives

Sergio Bayano-Tejero^a, Diego Martínez-Gila^c, Gregorio Blanco-Roldán^a, Rafael R. Sola-Guirado^{a,b,*}^a R.G. AGR 126 Mechanization and Rural Technology, University of Córdoba, Córdoba, Spain^b Department of Mechanics, University of Córdoba, Campus Rabanales, Ctra. Nacional IV, km. 396., 14014, Spain^c System Engineering and Automation Department, University of Jaén, Campus Las Lagunillas s/n, 23071 Jaén, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:
Post-harvesting
Sorting machine
Traceability
Batches
Quality

ABSTRACT

In the table olive sector, there is no cleaning and fruit sorting by quality in the field of the harvested olive batches, nor is there an exhaustive recording of traceability. As a result, the batches are stored and shipped dry, dirty and with fruit of different qualities. When they arrive at the industry, they are cleaned and sorted according to their quality, maturity index and size into fruit suitable for green or black processing and unsuitable for olive oil processing. Overall, all fruits are mixed regardless of their origin leading to loss or interruption of traceability, so that there are also inefficiencies in the logistical process. To offer a possible solution, this paper proposes a methodology and presents a prototype that enables cleaning and sorting based on quality at the field level, incorporating a liquid transport system to stop or reduce bruising and an application for recording traceability throughout the production cycle. This prototype has been tested in the laboratory with artificial olives to study the sorting algorithm and, subsequently, in field conditions in a harvesting campaign with real fruit. The algorithm reported a mean relative error of $9.02 \pm 6.66\%$, $11.63 \pm 9.61\%$ and $10.31 \pm 8.85\%$ in the test with 3 predefined sizes and 3 different ripening stages evaluated. In the evaluation test of the fruit bruising with 2% and 10% of controlled damage, results of $2.67 \pm 1.74\%$ and $10.09 \pm 4.55\%$ respectively were obtained. In the field, the grading machine for small size olives removed 98% of small diameter fruit and the cleaning system worked efficiently. The percentage of correct sorting based on the maturity index reported 89.3% for 'A' or suitable quality and 76.7% for 'B' or unsuitable quality. The fruit bruising sorting reported acceptable results influenced by the randomness in the bruising and its positioning with respect to the artificial vision system. The application recorded the previous operations, the batches generated and their characteristics as well as transport to the industry with its associated variables. The methodology and prototype developed may represent an advance in the management of the quality and traceability of table olives from the field level, making the logistics function more efficient and supporting the industry.

1. Introduction

Globalisation in the food trade has increased the need for product traceability systems, both due to current legislation and the quest for food safety and quality (Aung and Chang, 2014). Moreover, in recent years, consumers have become more demanding in this respect and value the transparency they receive positively, increasing their confidence in the product they consume (Qian et al., 2020). In the olive sector, traceability normally begins with the arrival of the fruit at the industry. Previous field operations (fertilisation, application of

phytosanitary products, pruning, harvesting, transport, etc.) are rarely accurately recorded beyond the field notebook that the farmer is required to submit to the competent authorities (Bayano-Tejero et al., 2019). In table olives and green processing, the situation is similar and there is no proper field-industry connection; the fruits are processed with the aim of achieving homogeneity, quality and adequate safety (IOOC, 2004). To do so, the harvested fruit batches arriving at the industry are sorted to select those that can be marketed as table olives and those that must be sent to the mill for oil. The processing consists of several phases and involves a loss of traceability information that has

* Corresponding author at: Department of Mechanics, University of Córdoba, Campus Rabanales, Ctra. Nacional IV, km. 396., 14014, Spain.
E-mail address: ir2sogur@uco.es (R.R. Sola-Guirado).

<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112278>

Received 12 December 2022; Received in revised form 27 January 2023; Accepted 30 January 2023

Available online 3 February 2023

0925-5214/© 2023 The Author(s). Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

already been previously recorded (Sánchez Gómez et al., 2006): 1) cleaning of the fruit batches and elimination of small size fruit; 2) separation of olives with advanced ripeness (maturity index >3, (Ferreira, 1979); 3) cooking with lye that homogenises its colour, changing it to a yellowish tone and concealing any disturbance that the fruit may have (Ramírez et al., 2015); 4) washing to remove the remains of lye; 5) sorting according to the defects present and their size to determine the marketing categories of the fruit; 6) packaging of the product.

Sorting operations according to quality are carried out by machines that evaluate several external parameters such as size, damage or external maturity index (Díaz, 2016) or internal maturity, composition, etc. (Guzmán et al., 2013). The machines for mechanical sizing are made up of lanes with cables or rollers with sufficient separation to let the small fruit fall between them and let the fruit of adequate size pass through. Sorting machines, on the other hand, have conveyor belts on which the fruit passes through an evaluation system. Inside it, using image processing and artificial vision techniques (Puerto et al., 2015), each fruit is partially or totally evaluated and a category is assigned to indicate its suitability to continue with the normal process or to be discarded. The fruit is then either discarded at the end of the belt, usually by being blown with compressed air where it falls onto another belt, or it is evaluated as not discarded and continues circulating along the route set for suitable olives. The discarded olives are stored and sent to the mill for oil extraction.

Currently, all this processing is carried out at the industry and there is no post-harvest operation in the field before transporting the fruit batches. There are no portable field systems that integrate the functions of reception, cleaning, sorting and storage in a single machine. Neither there are systems that can be quickly and easily placed in the field to process the harvested fruit batches and thus avoid transporting those of insufficient quality. In a few cases, some farms clean the fruit with machines from the industry adapted for the field (Cuberos Gallego, 2007; López Moreno, 2007). Subsequently, the fruit is transported, normally dry, in conventional trailers or in palletised boxes. Some farms carry out a previous cleaning of the fruit in the field with a liquid storage system using tanker trucks equipped with a liquid solution of sodium hydroxide previously refrigerated at the industry, which avoids fruit bruising caused by mechanised harvesting (Sola-Guirado et al., 2020). However, this liquid treatment is normally carried out at the industry facilities once the fruit has been received (Rejano et al., 2010), where machines that perform this function by optical sensors are used for batch sorting according to fruit quality, although they are not linked to traceability systems in the field and the information extracted is not associated with field operations (Rufino Valor, 2000; Simon Hendrik et al., 2022; Soler Esteban and Van Olmen, 2014). This is a handicap in achieving a comprehensive traceability system. There are also machines for the removal of the small size olives or sorting them into several sizes that allow for a suitable subsequent cooking process depending on the size of the fruit (Ibañez Reche and Ibañez Reche, 2003).

The traceability management of batches generated in the field level requires an efficient system that allows the relevant information to be associated with each operation so that it can be recorded, retrieved, sent and properly assessed. RFID technology has proven to be suitable for this purpose (Sánchez Solana et al., 2011), a technology with established standard protocols, a wide variety of different readers and tags and a relatively low investment for its application in the logistics sector (Dadi et al., 2021). This technology, together with geo-referencing systems, enables recording the route followed by field operations machinery and means of transport of the fruit, making it possible to trace the route of the entire flow of the fruit until it reaches the industry and its departure to the final point of sale (Lam and Ip, 2019). The information generated in the field, during transport and at the industry can be stored and displayed to the user via cloud computing technology. The use of common recording and data exchange platforms through standard established protocols enables the integration between field and industry to achieve comprehensive traceability during the production cycle (Bayano-Tejero

et al., 2019). Therefore, it is necessary to create a system for managing the fruit in the field, as well as its logistics, which allows for a successful connection field-industry in order to maintain the traceability and fruit quality, sending the required fruit from its origin to the industry.

In the context of the Innolivar PCP project, the University of Córdoba, in collaboration with the company Integración Sensorial y Robótica (ISR), has designed a portable mechanical assembly consisting of a trailer for use in the field to record the traceability of harvested fruit batches, their cleaning and sorting to generate batches of suitable quality for table olives. This prototype is accompanied by another thermally-insulated and temperature-controlled trailer for the olives that will be shipped for green processing olives. The two trailers are connected to a cloud computing system shared with the field operations machinery to record information on the fruit traceability from the field to the industry. The aim of this work is to evaluate the feasibility or performance of this system to connect the field operations after the harvesting operation with the industry, differentiating between olive qualities and maintaining the traceability of the product.

2. Materials and methods

This section describes the prototype developed consisting of two trailers and the technologies integrated (Section 2.1). It also details the software developed to perform the functions for which they have been designed (Section 2.2) as well as the working methodology (Section 2.3).

2.1. Hardware

2.1.1. Prototype developed

The prototype comprises two towed trailers, one dedicated to reception, cleaning and sorting (TRCS) and the other for field storage and transport to the industry (TST) (Fig. 1). The first can be towed by a tractor or other type of vehicle, has authorised dimensions for road transport (7×4x 2.5 m) and can be located on a plot close to the area where harvesting is carrying out to reduce the time from harvesting to processing for sorting into qualities. On the trailer there is a hopper for reception with an approximate capacity of 3 m³ which unloads the flow of fruit onto an elevator belt. This belt drives the fruits towards a small size grading machine based on rollers with a separation of 12 mm between them which removes small diameter fruits which are not marketable for table olives. The small size fruits fall onto an auxiliary belt which finally unloads onto a conveyor belt for discarding. Subsequently, by means of a blower, the fruits flow is cleaned of leaves and small branches and falls onto the de-stemmer, which finishes the cleaning phase by removing the largest branches. Then the flow of fruit that has passed through the de-stemmer enters the sorting belt and is divided into 16 physically separated lanes. On this belt, the fruits flow passes through the sorting system, which carries out a fruit-by-fruit evaluation and those olives with a negative evaluation are removed from the initial flow by means of nozzles that eject compressed air at 6-bar pressure. The discarded olives change their trajectory and fall onto the 'B' or discarded quality exit belt, joining it with the small size olives removed in the cleaning phase. The remaining fruits flow, which is of 'A' or suitable quality, falls by gravity and follows its natural trajectory towards another exit belt. This belt unloads onto the transport trailer with pre-loaded and industrially-cooled liquid. The TST trailer measures 5.7×2x2 m and carries on its structure a thermally insulated drum with a 4 m³ capacity, equivalent to approximately 2000 kg of fruit considering a fruit density of 700 kg/m³ and a liquid preload of 1.2 m³. The fruit is loaded through a circular opening 50 cm in diameter at the top of the drum and is discharged at the industry by gravity at the rear part of the drum by opening a manual PVC ball valve.

2.1.2. Integrated technologies

The TRCS trailer is mainly controlled by a PC and a Programmable Logic Controller (PLC) (Simatic ET 200 S, Siemens, Germany)

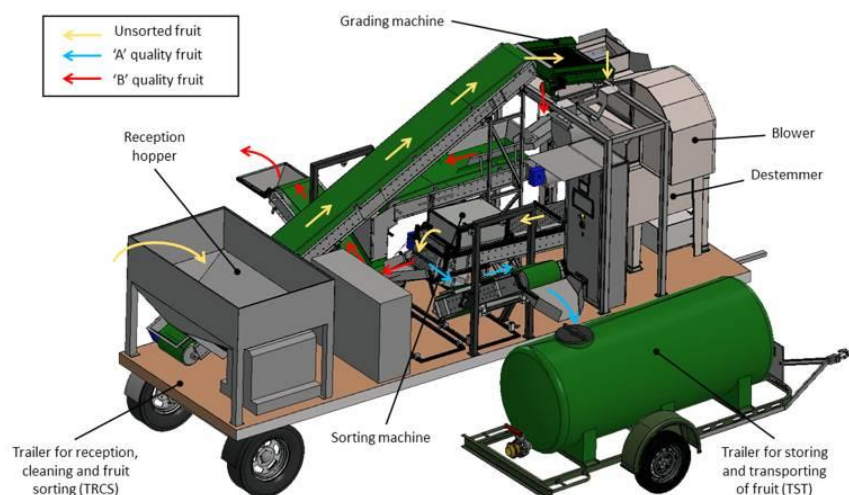


Fig. 1. TRCS-trailer for receiving, cleaning and sorting operations and TST-trailer for storage and transport to the industry. The arrows indicate the flow of unsorted fruit and the flow of each quality, A and B.

interconnected via Ethernet. The PLC is responsible for the activation/deactivation of several motors controlling the conveyor belts through frequency inverters (L510s, TECO, Australia) and the control of the conveyor belts as well as the motors of the cleaning systems is done through a Human-Machine Interface touch screen (HMI) (6AV2123-2GB03-0AX0, Siemens, Germany). The PC manages the rest of the processes on board the TRCS, including sorting, weighing, batch identification, geo-referencing and sending the generated data to an application for logging and visualisation. The sorting system consists of 16 independent modules that control the sorting process of the 16 lanes, each module consisting of a 2 GB RAM microprocessor board (Raspberry Pi 4, Raspberry Pi Foundation, United Kingdom), a 5MP camera (OV5627, Raspberry Pi Foundation, United Kingdom), a 16-relay base and 16 high-frequency solenoid valves (SX11F-HH, SMC, Japan). Two 0.5 m long LED bars of 3500 lm have been used for the illumination. The image capture is controlled by a photoelectric sensor (VTE180-2P42442, Sick, Germany) which detects the gaps in the belts where the olives can be placed and orders the capture of images at the right moment, avoiding desynchronisation. Each of the modules communicates with the PC through a switch to send the information extracted from the fruit and receive the configuration of the sorting parameters. The geo-referencing of both trailers is done through a Global Navigation Satellite System (GNSS) (DIYmalls, VK-162, China) with USB connection and they integrate a Radio Frequency Identification (RFID) system with an Ultra High Frequency (UHF) reader located on board the TRCS trailer (CF-RU5309, Chafon, Shenzhen) that detects and reads a passive EPC Gen2 tag located on the bumper of the TST trailer. In this way the trailer transporting the batches of 'A' quality fruit is permanently identified in the field and at the industry by the ID associated with the batch. The batch weight is monitored by means of scales (PRS-10 T, GRAM, Spain) connected to a reader (MK3, GRAM, Spain) with RS232 connection to the PC for data reading. The TST trailer has a 2 GB RAM microprocessor board (Raspberry Pi 4, Raspberry Pi Foundation, United Kingdom) to which the Global Navigation Satellite System (GNSS) (DIYmalls, VK-162, China) is connected via USB connection and a PT100 temperature probe (174-7517, RS PRO, United Kingdom) to monitor the transport liquid. The evolution of the liquid temperature is monitored in real time by the operator on a 7" touchscreen (Raspberry Pi Touchscreen, Raspberry Pi, United Kingdom) in order to guarantee the properties of the solution and the optimal conservation of the olives until they reach the industry. The data generated in both trailers are recorded in a database for analysis and

visualisation by means of 3 G/4 G modems (WE826-T2, Cioswi, China). Fig. 2 shows the interconnection of the different elements of both trailers.

2.2. Software

For the operation of both trailers, several applications have been developed for the control of the TRCS and TST functions, as well as the recording and visualisation of the information generated and its transfer to the industry.

2.2.1. Sorting algorithm

The sorting algorithm has been developed in Python 3.7 and the OpenCV library has been used as the basis for the evaluation of the sorting parameters. The flow diagram defined for the algorithm is detailed in Fig. 3. The steps of the programme cycle for the olives evaluation in the sorting system are detailed below:

1. Image capture and olive detection.

The algorithm starts with the reading of the photoelectric sensor that enables the capture of an image at the exact moment in RGB format with a resolution of 96 dpi. The camera configuration is ISO= 800, frameRate= 90, shutterSpeed= 250 and awbGain= 3.0. The image is sent to the PC application dedicated to the visualisation of images and data. In parallel, the microprocessor board processes the image to detect the presence or absence of fruit in it. For this purpose, the image is converted to greyscale and a threshold of 85 value is applied to binarise and invert the image. Subsequently, small areas of the image are removed by means of an opening operation (erosion + dilation). Then, the number of pixels with a different 0 value is counted to calculate those corresponding to an olive. Due to the size of the fruit with respect to the captured image, it has been established that an olive must have a number of pixels between 10,000 and 70,000, so that the presence or absence of fruit can be confirmed. If there is no fruit, the image is discarded, and if there is, the image continues with step 2.

2. Fruit area evaluation.

Once the fruit has been detected, the fruit projected area is evaluated. For this, the number of pixels is multiplied by a scale factor of 0.00479 mm/pixel, which returns the fruit area in mm². This area is then compared with a reference value (100 mm²) corresponding to the fruit area considered by the industry as a small size olive. If the

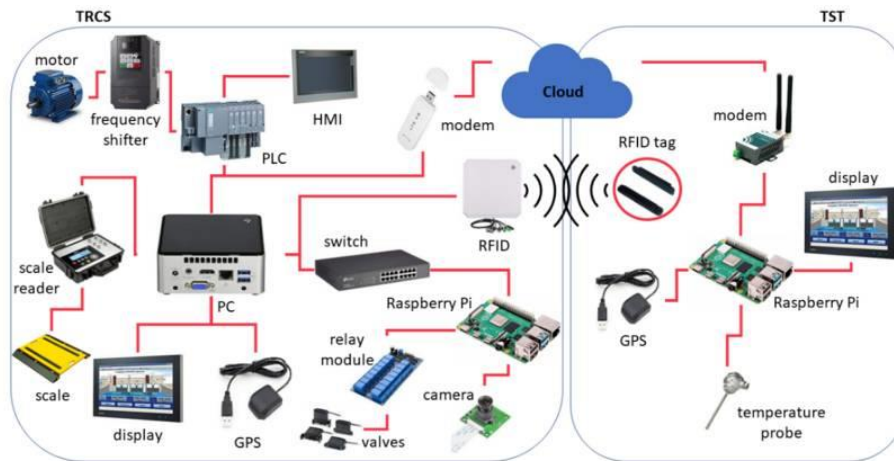


Fig. 2. Electronic interconnection between the different elements in both trailers, TRCS and TST.

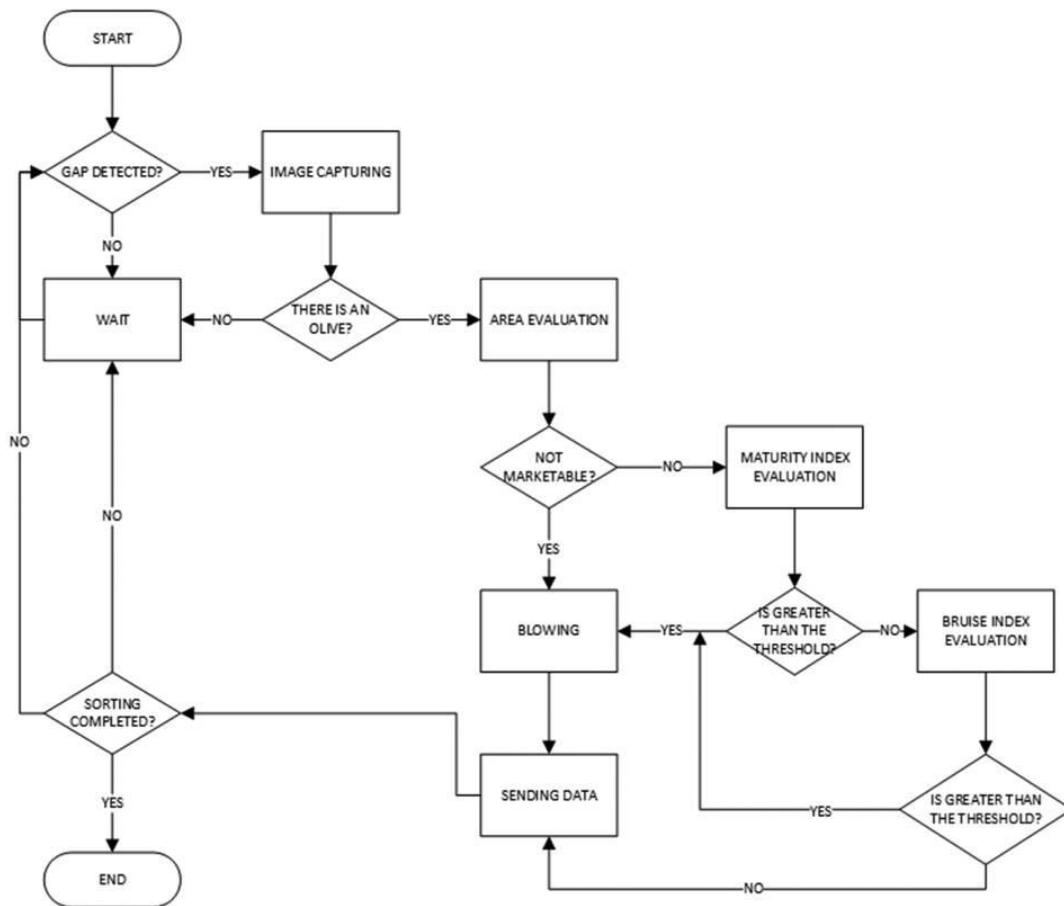


Fig. 3. Flowchart with the different steps executed in the sorting algorithm.

result of this comparison is that the fruit area is greater than the reference value, the fruit is considered valid and continues with step 3, otherwise the fruit is considered as small size olive and must be

discarded. In this case, the algorithm does not continue to evaluate the maturity index or the bruising and goes directly to step 5.

3. Maturity index evaluation.

For the maturity index evaluation, an AND operation is applied between the previously binary image of the fruit obtained and the green channel of the original capture. The result is another image (mask) where the fruit is represented only by the green channel and the background has a 0 value in each pixel. By adding up the values of all the pixels in the mask and dividing by the number of fruit pixels found above, an average colour value in the green channel is obtained. As a last operation, the conversion to greenish factor (%) is carried out taking as reference values previously saved those corresponding to a green and black fruit using the following expression (1):

$$\text{greenish factor} = \left(1 - \frac{A_v - R_b}{R_g - R_b}\right) \cdot 100 \quad (1)$$

Where A_v is the average level of the green channel of the olive evaluated, R_b is the average level of the green channel of a black olive and R_g is the average level of the green channel of a green olive. Previously, to calculate the reference levels and to calibrate the sorting system, it is necessary to obtain an average level of the green channel of a significant number of olives that are completely green and others completely black. Once the greenish factor has been calculated, it is compared with a reference value (50) used to decide whether to discard the fruit. If the greenish factor is higher than the reference value, the fruit is discarded and goes directly to step 5. If it is lower, the next step is the bruise index evaluation (step 4).

4. Bruise index evaluation.

This process is carried out only with green olives coming from the previous step. For the bruise index evaluation, the original RGB capture is converted to the HSV colour space and the S (Saturation) channel is selected to highlight the spot. The S-channel image is binarised by applying a threshold value (110) and then erosion and dilation operations are performed to remove noise and smooth the contours of fruit and speckles. The background is then removed and a mask of the fruit without background is created, while an AND operation with the S-channel and the fruit mask isolates the bruising. After that a threshold value is applied in an interval for pixels with values between 1 and 200 and finally the pixels corresponding to the bruising are counted and the bruising percentage with respect to the total fruit is calculated using the total number of pixels. This percentage is compared with a reference value of 5% to decide whether to discard the fruit (Sola-Guirado et al., 2022). If the bruising percentage is higher than the reference value, the fruit will be discarded in step 5. If it is lower, the flow of 'A' quality fruit will continue.

5. Blowing.

In this step, the fruit with an area, greenish factor or bruising percentage greater than the established thresholds is blown. This operation is performed by means of a jet of compressed air whose duration is equal to the time spent from the sensor detects a rising edge on the belt until the next rising edge so that the fruits are diverted from their natural trajectory to fall on the 'B' quality output conveyor. The rest of the fruits considered valid will follow a natural trajectory to fall on the exit belt of quality 'A'.

6. Sending data.

This step is carried out in parallel with step 5. Once the evaluation of each fruit has been completed, the extracted data relating to area, maturity and bruise index are sent to the PC application for their management and visualisation in the developed interface.

2.2.2. Interface for monitoring and sorting classification

The application has been developed in Java language and is executed by the PC of the prototype. This application receives the data (images and parameters) provided by the microprocessor boards; it is connected to the weighing equipment, RFID and GPS to identify and geo-reference

the traceability of the batches. The developed interface has 3 windows with different functions (Fig. 4). In the first window, the batch cleaning and sorting process can be started and different parameters are displayed for the batches that have been processed. These parameters are timestamp, batch number, harvesting machinery used, associated TST transport, GPS location of the TRCS trailer and batch parameters (weight, average area, greenish factor and bruising). In the second window, the images captured by each of the cameras installed in the 16 lanes are displayed continuously at configurable time intervals. In this window it is possible to activate/deactivate each lane independently and to configure the parameters used for the classification. In the third window it is possible to visualise in real time area, bruising index and greenish factor for the evaluated fruits.

2.2.3. Traceability log application

The traceability control application has 5 modules ('Planning', 'Traceability', 'Costs' and 'Users') comprising different functions (Fig. 5). The 'Planning' module consists of different sections (operations, plots, machinery, products, industries and weather). In the 'Plots' section, the user creates the plots on which the operations can be carried out with their characteristics. In the 'Machinery' section, the user has the possibility of registering the machinery used with its specifications. In the 'Products' section, the user can register the products usually used with registration number and dosage applied in operations such as fertilisation or phytosanitary applications. In the 'Industries' section, the user can register those processing factories that receive the fruit batches and their respective locations. In 'Weather', the user can consult information on nearby weather stations, as well as weather forecasts for the next few days. Finally, in the 'Operations' section, the user can create an operation to associate the plot, machinery, products or industries involved in order to create the product traceability from the field. The 'Traceability' module consists of 2 sections, 'Batches' and 'Transport'. In the 'Batches' section, the user can consult the traceability of processed batches by means of an identifier, start and end time of processing, associated parameters (average area, greenish factor, bruising index and weight), the identifier of the machinery used for harvesting and the destination industry. In the 'Transports' section, the user can consult the transports carried out, the batches transported in them and the route followed until reaching its destination. The cost module has 2 sections, 'Reports' and 'Adjustments'. In the 'Costs' section, the user can assign an hourly cost to each operator and machine used during the different operations, so that in the 'Reports' section the total cost of each operation can be obtained in a simplified way, considering personnel and machinery. Finally, in the 'Users' module, the user can create different profiles and assign them permissions to access the information recorded in the application database. Thus, depending on the permission obtained (operator, administrator or industry), it will be possible to access different information and perform query, edit or delete functions. For the industry, this profile only allows the consultation of the production cycle where the complete traceability of the fruit is shown.

2.3. Methodology

The proposed work methodology involves recording all previous operations (phytosanitary applications, pruning, irrigation, fertilisation, etc.) carried out in the field through the traceability control application executed from a mobile device (smartphone or tablet). Subsequently, the harvested fruit is transported to the processing location in the field by the different types of machinery (tractors with trailers, with shovels or integral harvesters). In all these operations the geographical coordinates have been registered thanks to the GPS of the mobile device. At the processing location, the fruit is unloaded into the receiving hopper of the TRCS trailer and processed, when the generation of a batch with an ID associated to the fruit unloaded is started to get a certain batch quality. Before the fruit is stored, the TST trailer is identified by the RFID tag and associated with the ID of the batch being processed. Subsequently, the

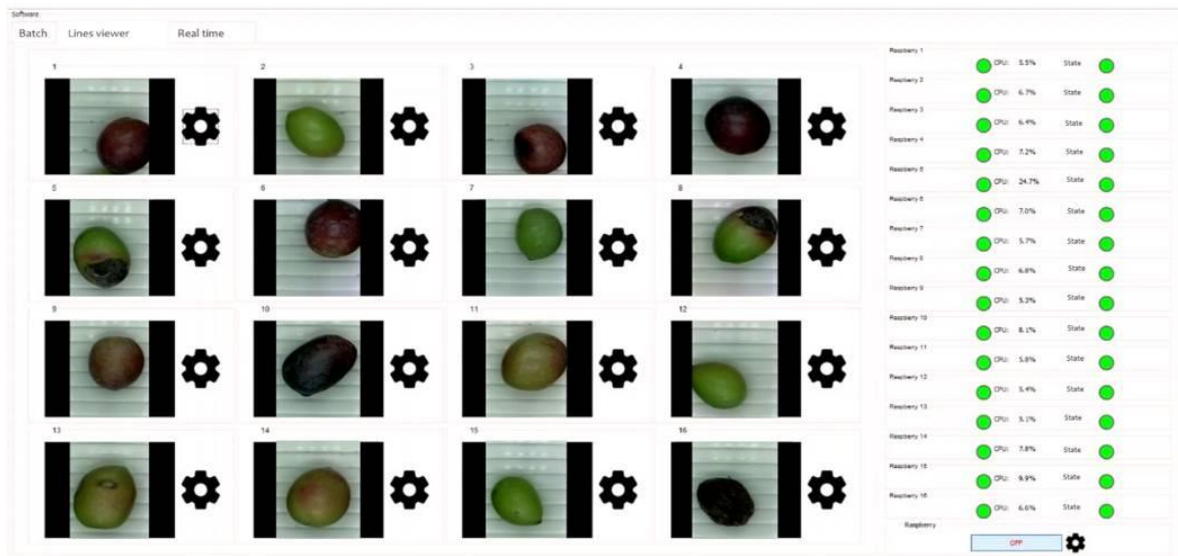


Fig. 4. Application interface developed to configuring and monitoring the sorting of fruit batches.

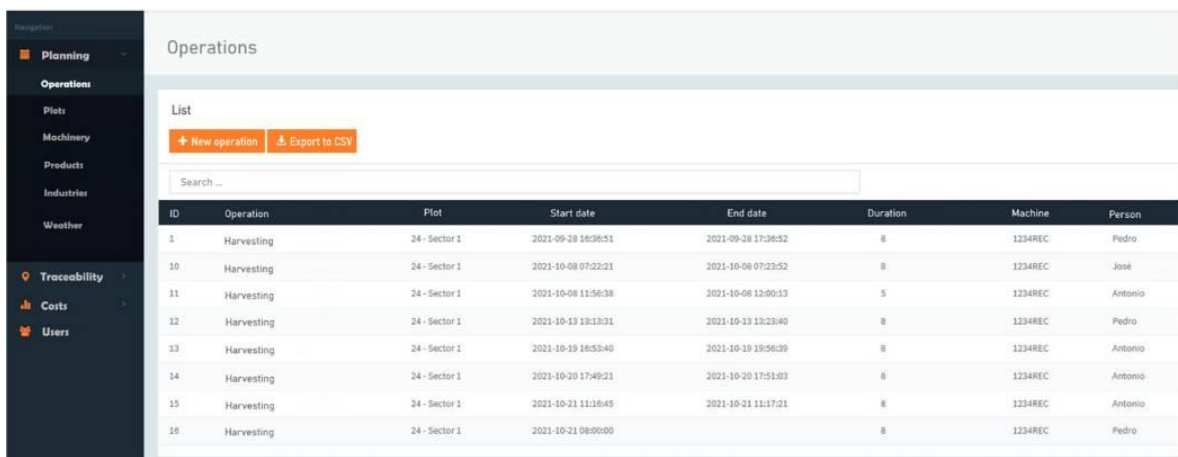


Fig. 5. Application interface developed to log the traceability of fruit batches.

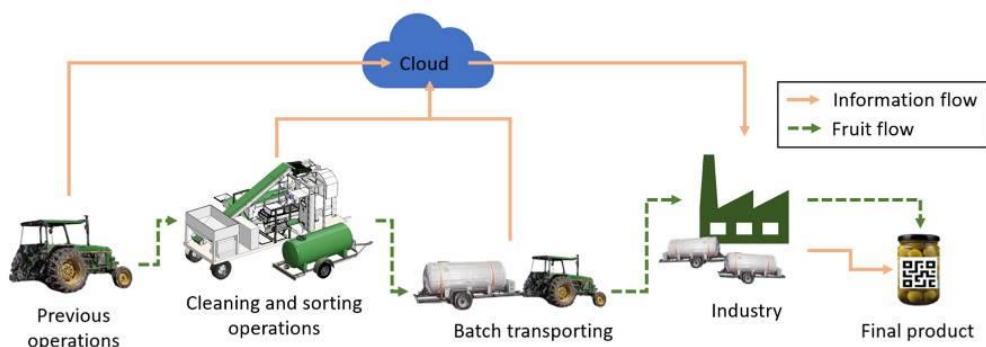


Fig. 6. Proposed methodology for recording the traceability and quality of fruit batches.

batches are stored in the TST trailer and transported to the industry ('A' quality) or to the oil mill ('B' quality) by another means of transport. This operation and the route followed to the industry are also registered through the same application; during the process, quality and traceability is ensured by connecting the two trailers to the application. Finally, the industry receiving the batches can access the information associated with them through the developed application and attach it to the information generated at their facilities (Fig. 6).

For the evaluation of the proposed methodology, as well as of the developed prototypes, two types of tests were carried out. First, laboratory tests were carried out with artificial olives only to evaluate the performance of the sorting algorithm under controlled conditions. Secondly, field tests were carried out with real fruit to evaluate the prototypes under real working conditions. Finally, the batch data generated by the prototype were recorded in the traceability log application and joined to the information previously recorded for field operations, weather and transport of the batches to the industry.

2.3.1. Laboratory test



For the laboratory tests, artificial olives manufactured by injection into a polymeric material were used. These fruits had characteristics similar in weight, shape and colour to real olives and let to perform test in controlled conditions, and their dynamic behaviour was very different from that of real olives and numerous projections could be generated by bouncing, as well as randomness in the mechanical sorting. Thus, it was decided to evaluate only the algorithm of the sorting system. The characteristics such as diameters, area, weight and colours in the L*a*b* colour space are shown in Table 1.

To simulate different conditions of fruit bruising index (BI), A1G artificial olives were labelled with a theoretical BI (2% and 10%) using a template on the equatorial part of the fruit. Subsequently, 125 fruits were sampled to study the actual BI against the theoretical BI of the templates (Table 2).

The laboratory evaluation to analyse the performance of the sorting algorithm consisted of 3 different tests with different artificial fruits batches that were passed through lanes of the machine in 5 repetitions for each test. From each test, the images acquired by the system and the size, greenish factor and bruising index parameters calculated by the algorithm were extracted.

- Fruit sizing: different olives batches were created with 20 units each one for A1G, A2G and A3G olives. The images captured by the cameras were extracted from each repetition and the measured size parameters were obtained.
- Fruit maturity: different olives batches were created with 20 units each one for A1G, A1P and A1B olives that simulated 3 different maturity indexes according to the Jaen Index, MI1 (green olive), MI3 (reddish-brown olive) and MI4 (black olive) respectively. Previously, to calibrate the system, the average of the pixels in the green channel was measured for 50 A1G fruits and for 50 A1B type fruits. The reference values obtained were 91 and 15 for A1G and A1B olives, respectively.

Table 2
Characteristics of the grinding performed on artificial olives used.

Nomenclature	Theoretical BI (%)	Measured BI (%)	Projected spot area (mm ²)	Appearance
A1G	2	1.75 ± 0.33	7.2536	
A1G	10	11.66 ± 3.1	36.268	

- Fruit bruising: a batch of 20 A1G olives with 10% bruising and another of 20 A1G olives with 2% bruising was created. In the first test, the olives were placed with the bruising in a perpendicular direction to the cameras of the sorting system. In the second test, the olives were placed randomly, without orienting the spots to observe the statistical variability depending on the orientation of the fruit.

2.3.2. Field test

The prototype was transported to a plot of intensive table olive grove of the 'Manzanilla' variety in Almodóvar del Río (Cordoba, Spain) (Fig. 7). Several tests were carried out during October 2021 to evaluate the performance of the developed prototype and the proposed methodology. Different batches of fruit were unloaded and the prototype was tested.

- Small fruit sorting: To evaluate size grading, 200 fruit samples were collected from the exit conveyor of the grading machine. Their largest and smallest diameters were measured using a calibre (Absolute CD 20 DCX, Mitutoyo, Japan). Likewise, 200 fruit samples were collected from the 'A' quality exit belt and the same measurements were measured to compare the efficiency grading machine.
- Green sorting: the maturity index scale proposed by Ferreira in 1979 was used (Fig. 8-below). Two repetitions were carried out for the green sorting test with 50 kg of fruit unloaded in the hopper and samples were collected on both exit belts ('A' and 'B'). The samples were a 10% of the total fruit weight at the exit



Fig. 7. TRCS and TST trailers located in a plot to test the performance during harvesting season.

Table 1
Characteristics of the artificial olives used for the laboratory tests.






Nomenclature	Unit weight (g)	Projected area (mm ²)	Volume (mm ³)	Length diameter (mm)	Width diameter (mm)	L*	a*	b*	Colour
A1G	5.1	362.68	4907.03	23.78	19.87	68.22	-50.73	53.13	
A1P	5.1	362.68	4907.03	23.78	19.87	36.95	4.92	-1.63	
A1B	5.1	362.68	4907.03	23.78	19.87	28.27	0.36	0.68	
A2G	3.33	278.17	3198.41	20.76	16.86	71.44	-45.81	59.36	
A3G	1.1	105.86	780.28	12.07	11.18	69.17	-46.41	58.26	



Fig. 8. Bruising categories (top) and maturity indexes (bottom) used in the field tests.

belt. To analyse the performance of the complete grading system (mechanical system and algorithm), the percentages of fruit existing in the hopper for each maturity index were calculated and also in the exit belts ('A' and 'B'). The fruit maturity index was visually evaluated one by one by an experienced sorting operator and considering the total surface area for each fruit.

- **Fruit bruising generated by the machine:** the classification proposed by Jiménez-Jiménez et al. (2013a) was used (Fig. 8-above). Fruit harvested by hand were used and unloaded onto the reception hopper. Later the fruit passed through the different elements of the prototype until reaching the exit belt of 'A' quality to evaluate the bruising generated by the prototype. Two repetitions of 5 kg each were carried out and fruit samples were collected at different sampling points. The samples were evaluated after 150 min to stabilise the bruising evolution (Jiménez-Jiménez et al., 2013a). The sampling points were at the entrance and exit of the grading machine (gm_in, gm_out), at the entrance and exit of the de-stemmer (dest_in, dest_out) and at the exit through the 'A' quality belt (A_out) prior to immersion in liquid. Because of the design of the prototype, an impact on the fruit is assumed at the previous discharge into the hopper at a height of approximately 1.80 m (discharge height with respect to the hopper floor). This is measured at the entrance of the grading machine, but this bruising decreases due to the subsequent impacts of fruit over fruit. At the exit of the grading machine, the fruit is bruised by contact with the grading machine rollers. At the entrance of the de-stemmer, the fruit suffers the impact with the rollers of the de-stemmer from a height of 0.75 m. Then, at the exit of the de-stemmer, it is again bruised due to contact with the rollers. In the final sampling point, at the exit for quality 'A', the fruit is bruised due to the movement along the sorting belt and the fall to the exit belt 'A' at a height of 0.25 m.
- **Fruit bruising sorting:** mechanically harvested batches were unloaded into the hopper. The fruit was harvested by means of a trunk shaker with a manual shaker and a complementary branch shaker. Two repetitions were carried out with 50 kg of fruit and fruit samples were taken at the different sampling points. Sorting by bruising categories was carried out only with completely green fruit (IM0 and IM1) due to the difficulty of visually determining the fruit bruising with higher maturity indexes, as well as the statistical majority of these compared to fruit with higher maturity indexes. The total surface area of the

fruit was evaluated and the same procedure was carried out for the two indexes.

- **Machine working parameters:** The processing speed of the prototype in kg/h was evaluated by unloading approximately 50 kg fruit batches into the reception hopper and measuring the time elapsed from the opening of the hopper to the completion of the entire batch on both exit belts. For the cleaning system, the organic material coming out of the blower and de-stemmer and the organic material coming out of the exit belts were evaluated to obtain the degree of cleanliness. The RFID technology for the identification of the batches was evaluated by the percentage of success in the reading of the trailer tag at the normal working distance (2.50 m). This distance is that from the antenna to the rear of the transport trailer where the tag is placed. To evaluate the weighing system of the batches stored in the TST trailer, the batches were weighed using the trailer scales and the results were compared with another reference scale (PCE-SW 1500 N, PCE Instruments, Spain). The TST trailer temperature probe tests were performed at an ambient temperature of 28 °C with 1000 l of water stored in the drum at an initial temperature of 21.5 °C and the cap closed to check the thermal insulation.
- **Traceability system:** the usual operations prior to the fruit processing in the TRCS trailer were introduced using the application developed. These operations were pruning, phytosanitary applications with the products applied and their respective doses, fertilisation with the product and dose used and harvesting. The route followed by the harvesting system was recorded using a mobile device with the application running and connected to the GPS. Subsequently, the data of the processed batches in the field (ID, date, area, bruising index, greenish factor, weight, origin and destination) were uploaded to the application database. The route followed by the batches transport trailer was recorded analogously to that of the harvesting system. The liquid temperature associated with the batches was obtained from the probe and insulation test. Weather data were obtained by connection to the weather station closest to the plot and associated with the batches. All information related to the batches life cycle was displayed in the application through the 'Production cycle' tab, also made available to the industry through a specific user.

3. Results

3.1. Laboratory test

The laboratory test with artificial olives reported good results in the algorithm evaluation (Fig. 9). In the size test, a mean relative error of $9.02 \pm 6.66\%$, $11.63 \pm 9.61\%$ and $10.31 \pm 8.85\%$ was obtained in the determination of fruit area for sizes A1, A2 and A3, respectively. The mean area of A1 size was above the actual area line while for size A2 and A3, the mean was below the actual area line. For the maturity index test using the greenish factor, $2.20 \pm 1.57\%$, $87.55 \pm 4.05\%$ and 101.06 ± 3.26 were obtained for the A1G, A1P and A1B artificial olives, respectively. The greatest deviation was obtained for the purple olives (A1P). The bruising results show that for the A1 olives oriented with the spots towards the camera, a bruising percentage of $10.09 \pm 4.55\%$ and $2.67 \pm 1.74\%$ were obtained for the simulated bruising percentages of 10% and 2%, respectively. In the case of olives randomly arranged on the sorting belt, a percentage of $1.54 \pm 3.26\%$ and 0.34 ± 0.90 for the 10% and 2% simulated bruising percentages were obtained, respectively.

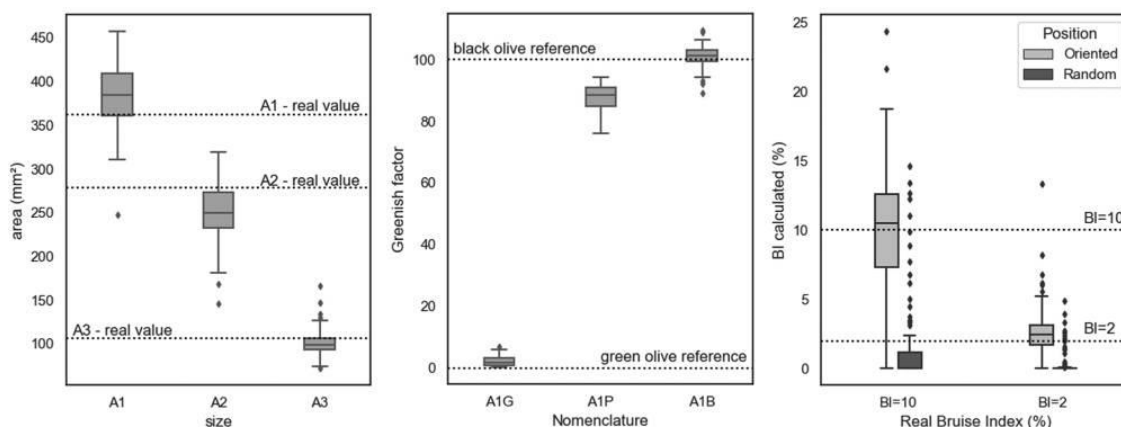


Fig. 9. Laboratory test results for different artificial olives size (left), different simulated maturity indexes (centre) and for different bruise index and fruit spot positioning.

3.2. Field test

Different batches of about 500 kg of harvested fruit were dumped into the reception hopper in an appropriate manner with a tractor equipped with a big box tipper at a height of 2.5 m from the ground. The hopper was opened to allow the olives to pass through and be transport to the grading machine.

- **Small fruit sorting:** The small-sized olives discarded by the grading machine had an average length diameter of 15.85 ± 1.99 mm and an average width diameter of 12.08 ± 1.50 mm. The olives in the 'A' output quality had a mean length diameter of 20.31 ± 1.86 mm and a mean width diameter of 16.30 ± 1.70 mm (Fig. 10).
- **Green sorting:** The sorting system according to fruit maturity index reported the following results (Fig. 11). Before fruit processing, a distribution of $61.1 \pm 2.64\%$, $14.59 \pm 0.01\%$, $15.59 \pm 0.47\%$, $8.72 \pm 3.1\%$ was obtained for MI1, MI2, MI3 and MI4 maturity indexes, respectively. For A output, mean hit rates of $73.64 \pm 0.62\%$, $15.66 \pm 0.68\%$, $7.82 \pm 0.85\%$ and $2.89 \pm 0.44\%$ were obtained for MI1, MI2, MI3 and MI4 maturity indexes, respectively. For B output, $10.29 \pm 1.19\%$, $12.97 \pm 4.92\%$, $50.4 \pm 4.51\%$ and $26.34 \pm 0.77\%$ were obtained for MI1, MI2, MI3 and MI4, respectively.
- **Fruit bruising generated by the machine:** The amount of damage caused to the fruit along the different parts of the machine is shown

in (Fig. 12). In the first sampling point corresponding to the entrance to grading machine (gm_in) the fruit bruising is divided into practically 'Sound' or 'Slight' category bruising. Only about 1% of the fruit are moderately damaged. Subsequently, after passing through the grading machine (gm_out) the percentage of 'Sound' olives drops from approximately 55–10.8%, the percentage of olives with 'Sound' and 'Moderate' damage increases slightly. After passing through the grading machine and falling at the entrance to the de-stemmer (dest_in), the fruit percentage with 'Sound' category bruising drops again to 2.5%, as does fruit percentage in the 'Slight' category. However, there is a considerable increase, around 29% of fruit in the 'Moderate' category. There is also a low percentage of olives in the 'Severe' category and, even more so, with 'Cut and mutilation'. At the output of the de-stemmer (dest_out) is where the greatest increase in damage is observed in the 'Severe' and 'Cut and mutilation' categories with 13.8% and 3.3% respectively and the absence of undamaged fruit ('Sound'). Therefore, the percentage of fruit in the 'Slight' damage category decreased considerably, around 26%, and the fruit percentage in the 'Moderate' category increased. Finally, the lowest increase in the bruising percentage occurs on the 'A' quality output (A_out). The points that cause the most damage in this section is the entry to the sorting belt and the fall to the 'A' quality belt. The fruit percentage with category 'Slight' with a decrease of around 10% is the percentage increase among the rest of the categories with an increase of 6.6%, 2.4% and 0.9% for the

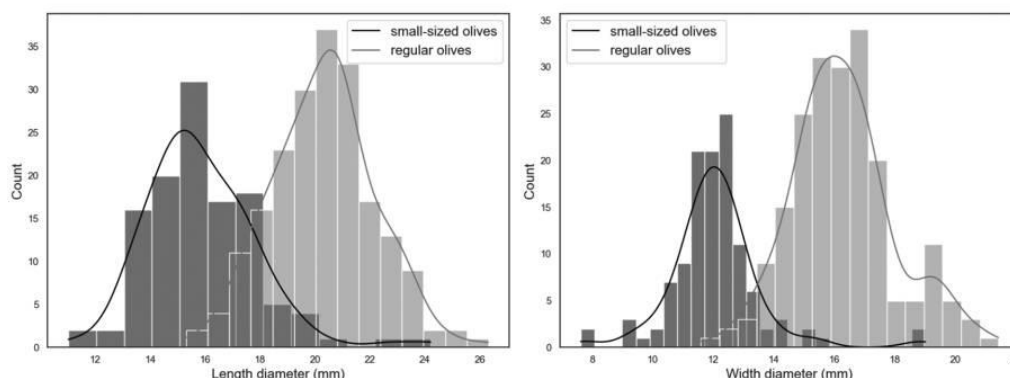


Fig. 10. Histograms of the length diameter (left) and width diameter (right) of the olives separated by the grading machine (black) and the 'A' output quality (grey).

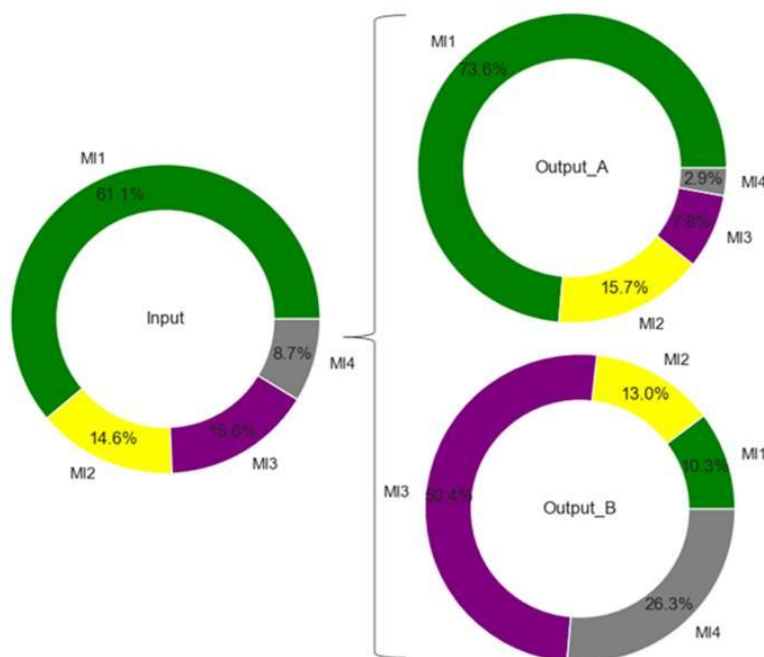


Fig. 11. Sorting results according to the fruit maturity index at the input (left) for 'A' and 'B' quality outputs (right).

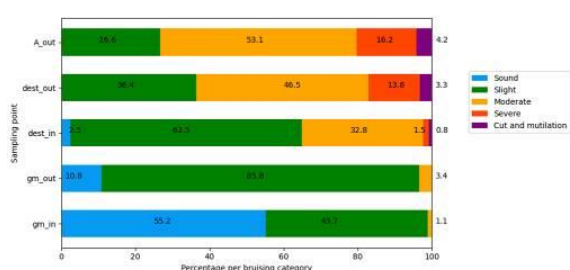


Fig. 12. Bruising cause by the prototype at different sampling points to hand harvested olives. GM_in and GM_out indicate the sampling points at the entrance and output of the grading machine, respectively. Dest_in and Dest_out indicate the sampling points at the entrance and output of the de-stemmer, respectively. A_out is the sampling point at the 'A' quality output belt.

categories 'Moderate', 'Severe' and 'Cut and mutilation', respectively.

- **Fruit bruising sorting:** Firstly, in the bruising sorting test, an incoming fruit batch was evaluated. The results obtained were a distribution for the bruising categories of 46.8%, 29.1%, 17.9%, 4% and 2.1% for 'Slight', 'Moderate', 'Severe', 'Cut and mutilation' and 'Sound', respectively. After the sorting and evaluation of the fruit batches with 'A' and 'B' quality, a majority of 'Slight' (46.1%) in 'A' quality compared to 'B' quality and 'Severe' (28.6%) in 'B' quality compared to 'A' quality. The rest of the categories are closer together, with the 'Moderate' category with 37.3% and 42.5% for 'A' and 'B' quality, respectively, and the 'Cut and mutilation' category with 6.8% and 10.5% for 'A' and 'B' quality, respectively. In neither of the two outputs were perfectly sound fruits observed without any bruising spots (Fig. 13).

- **Machine operating parameters:** The throughput rate measured during the tests was 973.82 ± 101.59 kg/h. The cleaning system was able to reduce the soiling of the incoming fruit batch for further processing (Fig. 14-left). The blower of the cleaning system was able to remove most of the leaves and small branches passing the grading machine ($95.1 \pm 3.2\%$). The system was not able to remove small stems attached to fruit or larger branches that are not deflected by the airflow due to their weight. The de-stemmer was able to remove all the large branches, leaving only a few small ones due to the rollers spacing and the branch size. 'A' quality batches presented a very adequate degree of cleanliness, optimising the batches transport and the cleaning operation at the industry (Fig. 14-centre). 'B' quality batches had some leaves falling through the grading machine rollers (Fig. 14-right).

RFID equipment achieved 100% accuracy in identifying the TST trailer at the specified distance. The weighing system connected to the trailer PC allowed weighing the batches to send their value to the application and a mean absolute error of 3.25 ± 3.05 kg was obtained. Water temperature was at a mean of 22.65 ± 0.38 °C. Initially, a slight increase was observed due to the contact of the water with the walls of the drum at different temperatures until reaching an equilibrium around 22.7 °C and remaining stable for approximately 4 h. Finally, an example of the production cycle recorded for a given batch is shown in Fig. 15.

4. Discussion

The dimensions of the prototype developed seem adequate for its correct operation and mobility in the field. The hopper opening surface that load the fruit on the belt goes to the grading machine was limited (900 cm²) and, in some cases, jamming occurred when the fruit batch contained excessive leaves and branches. The cleaning system worked well for supplying clean fruit batches to the sorting machine. This means that this process will not be required at the industry's facilities. The grading machine removed almost all the small-sized olives (98%). Those small diameter fruit that went out on the 'A' quality output belt were

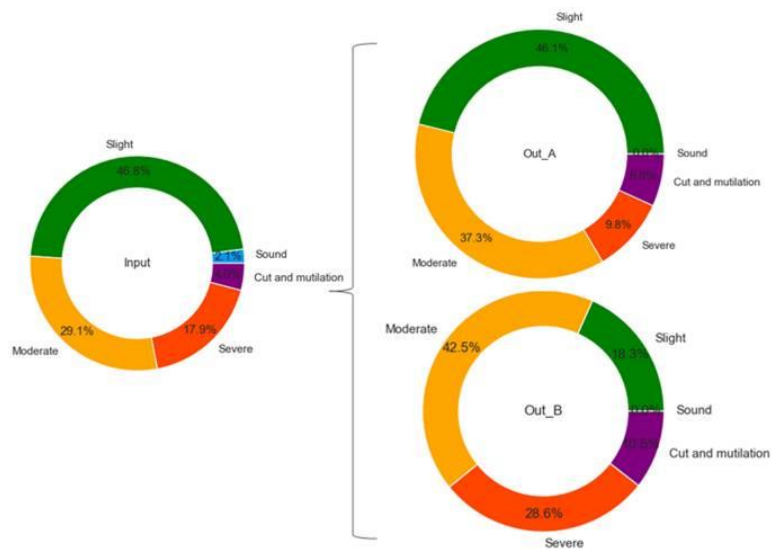


Fig. 13. Sorting results in fruit bruising test. Fruit at the input (left) against for 'A' and 'B' quality outputs (right).



Fig. 14. Fruit entry in the hopper (left) and 'A' quality output (centre) and 'B' quality output (right).



Fig. 15. Example of information recorded in the web application for the production cycle of a batch.

due several reasons. The slippage over other fruit without being in contact with the grading machine rollers and the subsequent evaluation as 'A' quality by the algorithm or mechanical failure in the sorting system. On the other hand, those with a larger diameter that entered through the grading machine (2%) were due to crushing during the harvesting operations or inappropriate handling of the fruit until it reached the prototype. The blower and de-stemmer removed most of the leaves and branches, $95.1 \pm 3.2\%$ and 100%, respectively. Presence of leaves and small branches can contribute to disturbing the sorting process, both the data of the algorithm and the mechanical sorting due to altering the fruit dynamic or trajectory. If the olive is attached to the stem, it may limit the air flow with its deposition on the nozzles. Modifying the position of the nozzles could solve this problem. The installation of the grading machine after the reception hopper caused a large quantity of leaves were together with the small-size olives and, consequently, by the 'B' quality output. Changing the order of the cleaning elements to blower-de-stemmer-grading machine would also result in a clean 'B' quality output, thus also optimising the transport of discarded batches to the oil mill.

There are many factors in the sorting system that affect the machine performance. The randomness in the orientation of the fruit with respect to the cameras can affect the algorithm by not correctly evaluating the dimensions (González-Merino et al., 2022) in those with the pedicel or the opposite part perpendicular to the camera or, also, for the maturity index evaluation. The maturity evolution colours of the fruit do not occur homogeneously over the whole surface of the fruit, so that some fruits can be wrongly classified with a different evaluated maturity index than the real one. The use in different varieties may modify the performance of the system if the same configuration is used, as there may be differences in their colour (Roca and Mínguez-Mosquera, 2001; García and Yousfi, 2005). The maturity indexes distribution at entry (Bartolini et al., 2014; Peri, 2014) will also determine the success percentage, since the greater the presence of MI3 and MI4 compared to the other indices, the greater the work required of the nozzles and, therefore, the greater the failure probability. The fruit order and the separation between them in the lanes of the sorting conveyor belt is essential for the proper operation of the sorting system. The coincidence of two or more fruit of different indexes in the same gap can cause failures in the fruit evaluation and in the subsequent sorting. Even with two fruits of the same index in the same gap, the contact between the compressed air jet can be ineffective and lead to an erroneous sorting sending each fruit to a different output. Anyway, correct fruit cleaning and fruit-by-fruit separation is essential for correct evaluation and to avoid blockages in the system. Finally, the belt speed and the air pressure ejected by the nozzles also influence sorting due to the dynamic behaviour they can have (Dumanay et al., 2016).

In laboratory tests with artificial olives under controlled conditions to assess size, ripeness and bruising, deviations were observed in the measurements obtained due to several factors. In the size test, these variations were due to the fruit movement due to the conveyor belt acceleration which modified its position in relation to the camera. This caused the fruit to rotate and, consequently, the projected area was smaller as it moved along its longitudinal axis. On the other hand, sometimes the fruit remained attached to the lane separators, causing the projected area to increase slightly, as occurred for the average area in size A1 ($383.31 \pm 35.13 \text{ mm}^2$) with respect to the theoretical area (362.68 mm^2). For sizes A2 and A3, the mean area was below (249.45 ± 30.62 and $100.25 \pm 13.28 \text{ mm}^2$, respectively) the theoretical area (278.17 and 105.86 mm^2 , respectively). For the maturity index test, deviations occurred due to illumination, colour mixing or soiling. Illumination caused some reflections on the plastic surface of the fruit causing colours other than the characteristic ones to appear. Moreover, in the case of MI3 olives, the final colour was obtained during the manufacturing process by mixing different colours, which made each fruit slightly different. Impurities or slight dirt from handling the olives caused some of them to show areas with different colours. In the bruising

test, the algorithm was evaluated using olives with the spots oriented to the camera and olives arranged randomly. In the test with the olives oriented and for both BI (2% and 10%), the deviations were due to several factors. On the one hand, the movement of the fruit with respect to its initial position due to the acceleration of the conveyor belt, which influences the estimation of the total fruit dimensions and, therefore, the bruising percentage. On the other hand, the variations in the pattern due to the labelling technique used and to the specular reflection of the light rays from the lighting system. In the test with the olives arranged randomly for both BI (2% and 10%), a high deviation was observed due to the fruit orientation, which on many occasions did not capture the bruising and, on others, was not captured in its entirety due to the non-implementation of a 360° fruit evaluation.

During the field test with real olives, in the entry the sum of MI3 and MI4 fruit percentages was 25% approximately and for MI1 and MI2 olives around 61% and 15%, respectively. With this distribution of fruit batches, a success percentage of 89.3% was obtained, considering the sorting of MI2 in 'A' output together with MI1 as success by the algorithm. Likewise, in the case of 'B' output, a 76.7% success rate was obtained in the sorting by considering MI3 and MI4 fruits as correct. In a MI2 fruit there are green and reddish-brown areas of the fruit in less than 50% of the fruit, so that many fruits of this index are considered by the industries as suitable for table processing. MI3 and MI4 fruits are considered as discarded and are not suitable for processing as table olives, so they are generally destined for oil production due to their good yield and quality (Guzmán et al., 2015). In the sorting test based on fruit bruising, most of the fruit was obtained in the 'Slight' category and to a lesser extent in the 'Moderate' category in the 'A' quality and, likewise, in the 'Moderate' and 'Severe' categories in the 'B' quality. The 'Moderate' category (37.3% in 'A' quality and 42.5% in 'B' quality) is present in both qualities with a close percentage due to the difficulty of the visual sorting of these fruits within this category in relation to the adjacent ones. On the other hand, the presence of olives in 'A' quality of 'Cut and Mutilation' category (6.8%) is because these fruits often have this damage located on one side. The success percentage in the sorting of the fruit quality evaluation machines without using fruit rotation is influenced by the variables to be measured and their location on the surface of the fruit. Damage distributed homogeneously over the fruit surface due to the damage generation process itself or the evolution of the fruit colours will improve the performance of the sorting system (Sola-Guirado et al., 2022).

The test to evaluate the most damaging points of the machine can be used to take corrective or palliative measures in future improvements to the prototype. The main damage was caused by impacts due to the fruit falling at different points at different heights. The point where the greatest increase in damage was recorded was at the output of the de-stemmer due to the compression suffered by some fruit because of imprecise alignment between the rollers, which caused some cuts and mutilations. Correcting this aspect would improve the damage generated at this point. To cushion the impact suffered by the fruit in the hopper and the drop to the 'A' output belt, padded surfaces could be installed to reduce the impact (Sola-Guirado et al., 2022). The results were obtained with 'Manzanilla' variety olives, being most susceptible to mechanical impacts. The use with other typical varieties for table olives such as 'Hojiblanca' would probably report better results in terms of bruising generation (Francisco Jiménez-Jiménez et al., 2013b).

The use of a refrigerated liquid NaOH solution improves quality by halting the bruising progress (Morales-Sillero et al., 2014). While the batch is being processed and stored in the field, the already processed olives are preserving the previous quality and the batch reaches the industry with a higher quality than that achieved by traditional transport methods (Rejano Navarro et al., 2008). However, it entails the need to first pass through the industry to fill the liquid in the TST trailer and then transfer it to the field, with the consequent increase in the cost of the transport operation. The TST trailer with RFID technology, contributes to the link between the field and the industry and to

interconnect the transported fruit batch with the information recorded on its previous traceability. Failure to sorting the batches in the field based on their quality means that the batches are separated at the industry and the traceability achieved upstream is lost. The TST trailer capacity is sufficient so that with 2 or 3 transports it is possible to complete the volume of a standard cooker used in the table olive industry (5000 kg) without the need to operate with the batches so as not to alter traceability. The more employed trailers to fill up the cooker capacity, the more complicated it will be to follow the fruit traceability. As the TST trailer contain only quality olives, the cooker could contain only two or three batches so the final product would only have the uncertainty of two or three possible locations. With the current mode employed in the sector, all batches are mixed in the industry and full traceability of the product is lost. In addition, the trailer could be scaled up to a larger capacity if it is desired to complete a cooker directly. Although the proposed methodology implies increased costs compared to traditional fruit management, the combination of post-harvest treatments and mechanical harvesting can be cost-effective compared to hand harvesting fruit (Zipori et al., 2021). Future work should go in the direction of applying the methodology and the prototype as a whole for at least two harvesting seasons.

The proposed methodology improves the transport logistics efficiency. On the one hand, generating batches of a certain quality in the field improves efficiency in the batches transporting, requiring fewer batches to transport the same amount of suitable table fruit compared to traditional methods. During the season, the fruit ripeness evolves, and it is usual to obtain at the end of the season around 15% or 20% of fruit with an advanced level of ripeness as well as fruit with unmarketable size or fruit in the second category due to defects. With the proposed methodology and the prototype, the non-marketable fruit is sent directly to the oil mill, avoiding intermediate transport from the processor to the oil mill and saving costs. On the other hand, the table olive industry only receives processable fruit with controlled quality and traceability batches or with very small quantities of fruit that cannot be processed for the table. This greatly minimises the industry's workload, increasing the processes productivity as they can be carried out faster by reducing the percentage of fruit to be removed. This is very important due to the harvesting season is concentrated in approximately one or one and a half month in the year and these processes are resource-intensive, both in terms of operators, machinery and energy. Finally, the web application centralises the information generated in the field phase and allows access to the information for both the farmer and the industry. On the one hand, connecting the industry to the web application with access to the batch information would also allow them to know in advance the batches that are being generated in the field to adapt their facilities more efficiently. In addition, industry may attach field batches traceability to that generated in its internal processes. On the other hand, the farmer can evaluate plot yield and know the fruit quality to be delivered to the industry to better manage sales prices. Also he can plan operations, material and personal resources managing the farm more efficiently. This also makes it easier to add the subsequent transport to the sale point, with the aim of providing the consumer with a history of the entire production chain. The use of technologies such as on-pack QR tags would allow consumers to access information in a simple and convenient way (Xueyuan and Bo, 2018).

5. Conclusions

A methodology has been proposed and a prototype has been developed consisting of two trailers (TRCS and TST) that allows the generation of fruit batches in the field of different qualities and the recording of traceability throughout the production cycle. The TRCS trailer prototype has been validated in laboratory conditions with artificial olives and in the field with real olives. Artificial olives were of different known sizes, maturity indexes simulated by means of different colours and bruising simulated through spots with certain dimensions. Laboratory results

have reported an average relative error of 10.32% for size sorting. The algorithm was able to correctly sort 3 different simulated ripening stages corresponding to MI1, MI3 and MI4. Regarding the fruit bruising, very similar fruit bruising percentages to those simulated in artificial olives of 2% and 10% have been obtained, reporting results of $2.67 \pm 1.74\%$ and $10.09 \pm 4.55\%$, respectively. The system operation in real working conditions during the harvesting season with olives of the 'Manzanilla' variety has reported promising results. The grading machine was able to remove 98% of the small-sizes olives. The fruit maturity sorting had a success rate of 89.3% for MI1 and MI2, and 76.7% for MI3 and MI4, both together. For the bruising, a sorting by categories was used, obtaining the predominant 'Slight' category (46.1%) in the 'A' quality output and 'Moderate' (42.5%) in the 'B' quality output. The cleaning system for leaves and branches removal performed adequately with 95.1% and 100% cleaning efficiency, respectively. The TST transport trailer had a suitable logistical performance for fruit storage and temperature maintenance. The web application recorded the traceability of the fruit batches from all field operations prior to batch processing until transport to the industry. Future research should test the prototype in several olive seasons to optimise its performance and study its economic feasibility.

CRedit authorship contribution statement

Sergio Bayano-Tejero: Field-test, Data collection, Formal analysis, Writing. **Rafael R. Sola-Guirado:** Conceptualization, Methodology, Project administration, Supervision, Investigation, Writing. **Diego Martínez-Gila:** Software development, Review & editing. **Gregorio Blanco-Roldán:** Review & editing.

Declaration of Competing Interest

The authors declare the following financial interests/personal relationships which may be considered as potential competing interests: Gregorio Blanco-Roldan reports financial support was provided by Ministry of Economy, Industry and Competitiveness.

Data availability

The authors do not have permission to share data.

Acknowledgment

Innolivar Project, - Public Purchase of Innovation in its modality of Pre-commercial -, according to the established in the Agreement between the former Ministry of Economy, Industry and Competitiveness (current Ministry of Science, Innovation) and the University of Cordoba, co-financed in 80% by FEDER funds, within the Pluriregional Operative Program of Spain 2014–2020. We also thank the financial support provided by the Interprofessional Organization of Table Olive and Olive Oil, Spain.

References

- Aung, M.M., Chang, Y.S., 2014. Traceability in a food supply chain: safety and quality perspectives. *Food Control* 39, 172–184. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.11.007>.
- Bartolini, S., Leccese, A., Andreini, L., 2014. Influence of canopy fruit location on morphological, histochemical and biochemical changes in two oil olive cultivars. *Plant Biosyst. Int. J. Deal. Asp. Plant Biol.* 148, 1221–1230. <https://doi.org/10.1080/11263504.2014.980360>.
- Bayano-Tejero, S., Sola-Guirado, R.R., Gil-Ribes, J.A., Blanco-Roldán, G.L., 2019. Machine to machine connections for integral management of the olive production. *Comput. Electron. Agric.* 166, 104980 <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104980>.
- Cuberos Gallego, J. de D., 2007. Máquina de limpieza de aceitunas. ES2265752A1.
- Dadi, V., Nikhil, S.R., Mor, R.S., Agarwal, T., Arora, S., 2021. Agri-Food 4.0 and innovations: revamping the supply chain operations. *Prod. Eng. Arch.* 27, 75–89. <https://doi.org/10.30657/pea.2021.27.10>.

- Díaz, R., 2016. Classification and Quality Evaluation of Table Olives, Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation: Second Edition. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802232-0.00014-1>.
- Dumanay, A.B., Sakin, R., Istanbulu, A., 2016. A new design of olive fruit sorting machine using color image processing. *Agric. Vet. Sci.* 9, 41–47. <https://doi.org/10.9790/2380-0911014147>.
- Ferreira, J., 1979. Explotaciones olivares colaboradoras, nº 5. Ministerio de Agricultura, Madrid.
- García, J.M., Yousefi, K., 2005. Non-destructive and objective methods for the evaluation of the maturation level of olive fruit. *Eur. Food Res. Technol.* 221, 538–541. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-1180-x>.
- González-Merino, R., Hidalgo-Fernández, R.E., Rodero, J., Sola-Guirado, R.R., Sánchez-López, E., 2022. Postharvest geometric characterization of table olive bruising from 3D digitalization. *Agronomy* 12, 2732. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112732>.
- Guzmán, E., Baeten, V., Pierna, J.A.F., García-Mesa, J.A., 2015. Determination of the olive maturity index of intact fruits using image analysis. *J. Food Sci. Technol.* 52, 1462–1470. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1123-7>.
- Guzmán, E., Baeten, V., Pierna, J.A.F., García-Mesa, J.A., 2013. Infrared machine vision system for the automatic detection of olive fruit quality. *Talanta* 116, 894–898. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.07.081>.
- Ibañez Reche, J., Ibañez Reche, R., 2003. Máquina clasificadora de aceitunas. ES1052950U.
- IOOC, 2004. Trade standard applying to table olives. COI/OT/NC no. 1.
- Jiménez-Jiménez, Francisco, Castro-García, S., Blanco-Roldán, G.L., Ferguson, L., Rosa, U.A., Gil-Ribes, J.A., 2013b. Table olive cultivar susceptibility to impact bruising. *Postharvest Biol. Technol.* 86, 100–106. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.06.024>.
- Jiménez-Jiménez, F., Castro-García, S., Blanco-Roldán, G.L., González-Sánchez, E.J., Gil-Ribes, J.A., 2013a. Isolation of table olive damage causes and bruise time evolution during fruit detachment with trunk shaker. *Span. J. Agric. Res.* 11, 65–71. <https://doi.org/10.5424/sjar/2013111-3399>.
- Lam, C.Y., Ip, W.H., 2019. An integrated logistics routing and scheduling network model with RFID-GPS data for supply chain management. *Wirel. Pers. Commun.* 105, 803–817. <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06122-6>.
- López Moreno, L., 2007. Máquina limpiadora de aceituna en el campo. ES1 065749U.
- 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 Cacerena') for mechanical harvesting in superhigh-density hedgerows. *HortScience* 49, 1028–1033. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.49.8.1028>.
- Peri, C., 2014. The Extra-Virgin Olive Oil Handbook, The Extra-Virgin Olive Oil Handbook. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK. <https://doi.org/10.1002/9781118460412>.
- Puerto, D., Gila, D., García, J., Ortega, J., 2015. Sorting olive batches for the milling process using image processing. *Sensors* 15, 15738–15754. <https://doi.org/10.3390/s150715738>.
- Qian, J., Ruiz-García, L., Fan, B., Robla Villalba, J.I., McCarthy, U., Zhang, B., Yu, Q., Wu, W., 2020. Food traceability system from governmental, corporate, and consumer perspectives in the European Union and China: a comparative review. *Trends Food Sci. Technol.* 99, 402–412. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.025>.
- Ramírez, E., Gandul-Rojas, B., Romero, C., Brenes, M., Gallardo-Guerrero, L., 2015. Composition of pigments and colour changes in green table olives related to processing type. *Food Chem.* 166, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.154>.
- Rejano, L., Montano, A., Casado, F.J., Sánchez, A.H., de Castro, A., 2010. Table olive: varieties and variations. In: *Olives and Olive Oil in Health and Disease Prevention*. Elsevier, pp. 5–15. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374420-3.00001-2>.
- Rejano Navarro, L., Sánchez-Gómez, A.H., Vega Macías, V., 2008. Nuevas tendencias en el tratamiento alcalino "cocido" de las aceitunas verdes aderezadas al estilo español o sevillano. *Grasas Y Aceites* 59, 197–204. <https://doi.org/10.3989/gya.2008.v59.i3.509>.
- Roca, M., Mínguez-Mosquera, M.I., 2001. Changes in chloroplast pigments of olive varieties during fruit ripening. *J. Agric. Food Chem.* 49, 832–839. <https://doi.org/10.1021/jf001000l>.
- Rufino Valor, J.R., 2000. Máquina para la selección de aceitunas. ES2149705A1.
- Sánchez Gómez, A.H., García García, P., Rejano Navarro, L., 2006. Elaboration of table olives. *Grasas Y Aceites* 57, 86–94.
- Sánchez Solana, A.M., Martínez López, L., Balsas Almagro, J.R., Pérez Cordon, L.G., Rivera Rivas, A.J., Fuertes García, J.M., Lucena López, M.J., Esteban Ruiz, F.J., López de la Torres, M.D., Parras Martín, A., Esteban de la Rosa, G., Santiago Marcos, L., Zafra Milla, J.P., García Sanz, A., Santaella Macías, A.J., 2011. Sistema para la clasificación automática de aceitunas. ES2369186A1.
- Simon Hendrik, E., Van Olmen, S., Soler Esteban, A., 2022. Product inspection and characterization device. US11249030B2.
- Sola-Guirado, R.R., Bayano-Tejero, S., Aragon-Rodríguez, F., Peña, A., Blanco-Roldán, G., 2022. Bruising pattern of table olives ('Manzanilla' and 'Hojiblanca' cultivars) caused by hand-held machine harvesting methods. *Biosyst. Eng.* 215, 188–202. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01.010>.
- Sola-Guirado, R.R., Castillo-Ruiz, F.J., Blanco-Roldán, G.L., González-Sánchez, E., Castro-García, S., 2020. Mechanical canopy and trunk shaking for the harvesting mechanization of table olive orchards. *Rev. la Fac. Cienc. Agrar.* 52, 124–139.
- Soler Esteban, A., Van Olmen, S., 2014. Machine for the inspection and sorting of fruits and inspection and sorting method used by said machine. US008816235B2.
- Xueyuan, W., Bo, Y., 2018. Research and design of traceability system of agricultural products, in: 2018 International Conference on Engineering Simulation and Intelligent Control (ESAIC). IEEE, pp. 384–388. <https://doi.org/10.1109/ESAIC.2018.00097>.
- Zipori, I., Fishman, A., Zelas, Z.B.-B., Subbotin, Y., Dag, A., 2021. Effect of postharvest treatments of mechanically harvested "Manzanilla" table olives on product quality. *Postharvest Biol. Technol.* 174, 111462. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111462>.

