

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y  
de Biosistemas



**Análisis de Ciclo de Vida de la  
Producción de Fruta de Hueso:  
Comparación entre Agricultura  
Convencional y Tecnologías de  
Agricultura Digital**

**TESIS DOCTORAL**

Presentada para optar al título de Doctor por:

**Pablo Marcos Núñez Cárdenas**

Ingeniero Agropecuario  
Master en gestión y tecnología Agronómica

Madrid, 2024



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas

**Doctorado en Agroingeniería**

**Análisis de Ciclo de Vida de la  
Producción de Fruta de Hueso:  
Comparación entre Agricultura  
Convencional y Tecnologías de  
Agricultura Digital**

**TESIS DOCTORAL**

Presentada para optar al título de Doctor por:

**Pablo Marcos Núñez Cárdenas**

Ingeniero Agropecuario  
Master en gestión y tecnología Agronómica

Bajo la dirección de:

Dra. Eva Cristina Correa Hernando

Dr. Guillermo San Miguel Alfaro

Madrid, 2024

Título: Análisis de Ciclo de Vida de la Producción de Fruta de Hueso:  
Comparación entre Agricultura Convencional y Tecnologías de Agricultura Digital

Autor: Pablo Marcos Núñez Cárdenas

Programa de Doctorado: Agroingeniería

Dirección de tesis:

Dra. Eva Cristina Correa Hernando. Profesora Titular de Universidad.  
Universidad Politécnica de Madrid

Dr. Guillermo San Miguel Alfaro. Profesor Contratado Doctor I3. Universidad  
Politécnica de Madrid.

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:

*A la memoria de mi padre, Sergio Núñez Lagos.*

*“Firmes y adelante, huestes de la fe  
Sin temor alguno, que Jesús nos ve”*

*Del Himno «Onward, Christian Soldiers»*

*Sir Arthur Sullivan, 1871.*



## Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todos aquellos que, de alguna manera, me han apoyado durante este periodo de formación académica. En especial, a mi familia: a mis padres, por su ejemplo de esfuerzo y superación, su educación, apoyo, motivación y amor. A mi amada esposa, Ana Belén, y a mis amados hijos, Valentina, Pablo y Josefina, por acompañarme en esta aventura en un continente y país distinto, por crecer juntos durante estos años y por su constante apoyo, amor y comprensión. También quiero agradecer a mi querido hermano mayor, Sergio, por ser un excelente hermano mayor, y a mis hermanos menores, Sebastián y Gabriela.

En el área académica, quiero agradecer a mis directores de tesis, Eva Cristina Correa y Guillermo San Miguel, por darme la oportunidad de realizar esta tesis bajo su dirección, por permitirme desarrollar sus áreas de manera conjunta y, a la vez, apoyarme, guiarme, motivarme y exigirme. En especial, quiero agradecer a la profesora Eva Cristina por estar en el día a día, por ser un ejemplo de académica integral que pudo ayudarme y apoyarme en diferentes momentos, ya fueran en el área académica o personal, por lo cual tiene mi más profundo respeto. También quiero agradecer al grupo de investigación LPF Tagralia, en especial a Belén, Pilar, Natalia, Blanca, Pablo y Antonio, por su tiempo para compartir e integrarme al grupo como uno más. Se extrañarán los desayunos de los viernes y las tertulias varias.

Finalmente, quiero agradecer al Rugby y sus valores, que me han abierto muchas puertas y a la vez me ha dado grandes amistades en diversos lugares. Especialmente, en estos años quiero dar un especial reconocimiento a la gran familia de Rugby Agrónomos “Sine Agricultura Nihil,” que me integró como uno más. Gracias a los capitanes, José María y luego Santiago por su cordialidad, y en general al gran grupo por integrarme. Donde conocí a grandes amigos que extrañaré.

También quiero agradecer al club de Rugby Cisneros y al segundo grupo, por todo su simpatía y, en especialmente al entrenador Nicolás Ayuso por motivarme a volver a jugar, lo que resultó ser muy beneficioso. Grande Nico. Fuerte abrazo. Azules días. ¡No parar hasta conquistar!

# Abstract

In the context of Spain's agro-food sector, which is of great economic importance and one of Europe's leading producers of fresh fruit, stone fruit cultivation faces significant challenges that affect its sustainability and competitiveness. The recent decline in production, coupled with a multifactorial crisis—including rising input costs, the impacts of climate change, and shifts in consumer preferences—highlights the need to rethink current production systems.

Within this framework, the primary objective of this thesis is to quantify and optimize the life cycle impact of the stone fruit production system in south-eastern Spain using Life Cycle Assessment (LCA) and advanced technologies. Its specific objectives include: i) analysing the carbon footprint and economic impact of the value chain using conventional process-based LCA and EEIOA; ii) assessing the social impact of packaged and ready-to-eat peach production using social LCA; iii) comparing environmental and economic impacts between conventional and precision agriculture; and iv) evaluating the sustainability of attributional LCA with precision agriculture in Murcia. Each study has resulted in a scientific publication.

The carbon footprint analysis using EEIOA and LCA reveals a 19% difference. These discrepancies arise from trade-offs in different life cycle stages. LCA, which focuses on specific processes, reports higher emissions in the initial stages, whereas EEIOA registers greater emissions during production and processing. These differences reflect the limitations of each methodology, as EEIOA accounts for economic inputs not considered in LCA. Nonetheless, both approaches agree that distribution and refrigerated storage are the primary contributors to carbon emissions.

Regarding the social analysis, the thesis combines the use of SHDB to evaluate generic social risks and PSIA to assess impacts on a stone fruit-based product. It identifies commercialization as the stage with the highest social risk, followed by processing, although the study focuses on the latter. The preliminary evaluation using PSIA assigns an average score of +0.88, indicating a social performance above the acceptable level and reflecting continuous improvement.

Additionally, the thesis compares the environmental, economic, and social impacts of attributional LCA in stone fruit production using Precision Agriculture (PA) techniques versus traditional practices. PA optimizes agricultural inputs—such as fertilization, irrigation, and pest control—to reduce resource use and

environmental damage. Five impact categories were assessed: climate change, photochemical ozone formation, acidification, eutrophication, and water use. Agricultural inputs, particularly fertilizers, were identified as the largest contributors to damage, except in water use. PA reduced input requirements and achieved 12%-26% savings in environmental impacts and costs.

The research highlights PA as an effective solution to mitigate environmental impacts and reduce economic costs in agricultural systems, achieving an 8% cost reduction due to lower input use. It also decreases social and environmental risks by 20%-30%, improving labour conditions and reducing forced and migrant labour.

In conclusion, the thesis underscores the relevance of integrated approaches and advanced technologies, such as Precision Agriculture, for achieving more sustainable agricultural production. It promotes practices that reduce environmental impacts, optimize costs, and improve social welfare, providing critical insights for sustainable agricultural policies and decision-making in the agroindustry.

In conclusion, this thesis underscores the importance of adopting integrated life cycle approaches and advanced technologies, such as PA, to achieve more sustainable agricultural production. The results support the need to continue promoting innovative agricultural practices that not only minimize environmental impacts but also optimize costs and enhance social well-being throughout the agricultural value chain. These findings are relevant for the formulation of sustainable agricultural policies and decision-making in the agri-food industry.

# Resumen

En el contexto de un sector agroalimentario español de gran relevancia económica, caracterizado por ser uno de los principales productores europeos de frutas frescas, el cultivo de frutas de hueso enfrenta importantes desafíos que afectan su sostenibilidad y competitividad. La disminución en la producción durante los últimos años, sumada a una crisis multifactorial que incluye incrementos en costos de insumos, impactos del cambio climático y transformaciones en las preferencias de los consumidores, plantea la necesidad de replantear los sistemas productivos actuales. En este marco, la tesis tiene como objetivo principal cuantificar y optimizar el impacto del ciclo de vida del sistema productivo de fruta de hueso en el sureste de España mediante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y tecnologías avanzadas. Sus objetivos específicos incluyen: i) analizar la huella de carbono e impacto económico de la cadena de valor usando ACV convencional y EEIOA; ii) evaluar el impacto social en la producción de melocotón listo para consumo con ACV social; iii) comparar los impactos ambientales y económicos entre agricultura convencional y de precisión; y iv) analizar la sostenibilidad del ACV atribucional con agricultura de precisión en Murcia. Cada estudio ha generado una publicación científica.

El análisis de la huella de carbono con EEIOA y ACV muestra una diferencia del 19%. Estas discrepancias surgen de compensaciones en distintas etapas del ciclo de vida. El ACV, centrado en procesos específicos, señala emisiones más altas en etapas iniciales, mientras que el EEIOA las registra en la producción y procesamiento. Estas diferencias reflejan las limitaciones de cada metodología: el EEIOA considera insumos económicos no incluidos en el ACV. Ambos coinciden en que la distribución y el almacenamiento refrigerado son los mayores contribuyentes a las emisiones.

En cuanto al análisis social de la tesis combina el uso de SHDB para evaluar riesgos sociales genéricos y PSIA para evaluar impactos en un producto de fruta de hueso. Identifica la comercialización como la etapa con mayor riesgo social, seguida del procesamiento, aunque el estudio se enfoca en esta última. La evaluación preliminar mediante PSIA otorga una puntuación promedio de +0.88, destacando un desempeño social superior al nivel aceptable y reflejando una mejora continua.

Además, la tesis compara el impacto ambiental, económico y social del ACV de procesos atribucionales en la producción de fruta de hueso con técnicas de Agricultura de Precisión (AP) frente a prácticas tradicionales. La AP optimiza

insumos agrícolas (fertilización, riego, tratamientos fitosanitarios) para reducir recursos y daños ambientales. Se evaluaron cinco categorías de impacto: cambio climático, ozono fotoquímico, acidificación, eutrofización y uso del agua. Los insumos agrícolas, especialmente fertilizantes, son los mayores responsables de daños, salvo en el uso del agua. La AP redujo insumos y generó ahorros del 12% al 26% en impactos ambientales y costos.

La investigación resalta que la Agricultura de Precisión (AP) es una solución efectiva para reducir impactos ambientales y costos económicos en sistemas agrícolas, con un ahorro del 8% en costos debido al menor uso de insumos. Además, disminuye los riesgos sociales y ambientales en un 20-30%, mejorando condiciones laborales y reduciendo el trabajo forzoso y migrante.

En conclusión la tesis destaca la relevancia de enfoques integrados y tecnologías avanzadas, como la Agricultura de Precisión, para una producción agrícola más sostenible. Promueve prácticas que reduzcan el impacto ambiental, optimicen costos y mejoren el bienestar social, aportando información clave para políticas agrícolas sostenibles y decisiones en la agroindustria.

# Tabla de Contenido

<i>Agradecimientos</i> .....	<i>vi</i>
<i>Abstract</i> .....	<i>vii</i>
<i>Resumen</i> .....	<i>x</i>
<i>Lista de Figuras</i> .....	<i>xivvi</i>
<i>Lista de Tablas</i> .....	<i>xx</i>
<i>Lista de Ecuaciones</i> .....	<i>xxiii</i>
<i>Abreviaturas y Acrónimos</i> .....	<i>xxiv</i>
<b>1 Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 El sector de la fruta de hueso .....	1
1.2 Crisis en el sector productivo.....	2
1.3 La sostenibilidad como paradigma productivo .....	4
<b>2 Hipótesis, objetivos y estructura de tesis</b> .....	<b>7</b>
2.1 Hipótesis .....	7
2.2 Objetivo general y objetivos específicos.....	7
2.3 Estructura de tesis .....	8
<b>3 Revisión bibliográfica</b> .....	<b>10</b>
3.1 Escenario de agricultura digital o agricultura de precisión.....	10
3.1.1 Evolución histórica .....	10
3.1.2 Agricultura de precisión vs Agricultura digital .....	11
3.1.3 Tecnologías para la agricultura de precisión .....	13
3.1.4 Tecnologías de medición.....	14
3.1.5 Tecnologías de información y comunicación .....	27
3.1.6 Tecnologías de posicionamiento y navegación .....	31
3.1.7 Tecnologías de reacción .....	35
3.1.8 Implementación de tecnologías de agricultura de precisión en la producción de fruta.....	37
3.1.9 La agricultura de precisión como escenario de estudio en el ACV 46	
3.2 Metodología de ACV Ambiental.....	47
3.2.1 Definición de objetivo y alcance .....	48

3.2.2	Análisis de inventario de ciclo de vida (AICV).....	50
3.2.3	Evaluación del impacto ambiental de ciclo de vida (EIACV) .....	55
3.2.4	Interpretación .....	64
3.2.5	Aplicación del ACV ambiental en la producción de fruta de hueso 65	
3.3	Metodología de análisis de costes de ciclo de vida .....	68
3.3.1	Metodología de costes de ciclo de vida convencional .....	71
3.3.2	Aplicación del análisis CCV a la producción de agroalimentaria	73
3.4	Metodología de ACV social.....	76
3.4.1	Definición de objetivo y alcance .....	78
3.4.2	Análisis de inventario .....	82
3.4.3	Evaluación e interpretación .....	86
3.4.4	Aplicación del ACV social en el sector agroalimentario .....	91
3.5	Metodología Análisis de Sostenibilidad de Ciclo de Vida.....	95
3.5.1	Definición de objetivo y alcance .....	96
3.5.2	Análisis de inventario de ciclo de vida .....	97
3.5.3	Evaluación e interpretación de impacto de ciclo de vida.....	97
3.5.4	Publicaciones relacionadas con la metodología ASCV.....	100
3.6	Otros marcos metodológicos para el análisis de sostenibilidad: Análisis Input-Output .....	107
3.6.1	Metodología.....	107
3.6.2	Metodología EEIOA en el sector agroalimentario. ....	111
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>115</b>
4.1	La huella de carbono de la producción de fruta de hueso: Comparación entre el análisis del ciclo de vida (ACV) y el análisis de Input-Output ambientalmente extendido (EEIOA).....	116
4.1.1	Materiales y métodos .....	116
4.1.2	Resultados y discusión .....	125
4.1.3	Conclusiones .....	134
4.2	Un estudio de caso sobre la aplicación de la Evaluación de Impacto Social de Producto al sector agroalimentario: Melocotón listo para consumir..	136
4.2.1	Materiales y métodos .....	136
4.2.2	Resultados y discusión .....	140
4.2.3	Conclusiones .....	145
4.3	ACV ambiental y económico del escenario de agricultura de precisión para la producción de frutas de hueso .....	146

4.3.1	Materiales y métodos .....	146
4.3.2	Resultados y discusión .....	150
4.3.3	Conclusiones .....	156
4.4	Evaluación tecnoeconómica, medioambiental y social de la agricultura de precisión para la producción de fruta de hueso .....	157
4.4.1	Materiales y métodos .....	157
4.4.2	Resultados y discusión .....	164
4.4.3	Conclusiones .....	168
<b>5</b>	<b>Conclusiones generales y futuras líneas de investigación</b>	<b>171</b>
5.1	Conclusiones .....	171
5.2	Líneas futuras de investigación.....	175
	<b>Referencias</b>	<b>178</b>
	<b>Anexo I</b>	<b>204</b>
	<b>Anexo II</b>	<b>207</b>
	<b>Anexo III</b>	<b>210</b>

## Lista de Figuras

Figura 1.1. Producción de fruta en España (millones de toneladas por año) (MAPA, 2024) .....	2
Figura 1.2. Líneas de investigación y desarrollo en fruta de hueso, e instituciones a cargo en la Región de Murcia (Cos Terrer, 2017).....	4
Figura 1.3. Desarrollo del concepto de innovación sostenible, modificado (adaptado de De Luca et al., 2017).....	5
Figura 3.1. La evolución tecnológica de la agricultura a través de la historia (adaptado de Neves et al., 2023) .....	10
Figura 3.2. Relación entre la gestión específica del sitio, la agricultura de precisión convencional y la agricultura digital (adaptado de McFadden et al., 2023) .....	13
Figura 3.3. Nodo sensor de propiedades del suelo (adaptado de García et al., 2021) .....	16
Figura 3.4. Clasificación de sensores de suelo según su funcionamiento y parámetros que miden (Las propiedades del suelo más probables de distinguir son las indicadas en fuente roja) (adaptado de Adamchuk, 2006) .....	17
Figura 3.5. Radar de penetración terrestre captura digitalmente propiedades de suelos de múltiples capas con precisión (Veris CoreScan™) .....	18
Figura 3.6. Funcionamiento de medidores de clorofila de transmitancia, fluorescencia y reflectancia (adaptado de Padilla et al., 2018).....	21
Figura 3.7. Imagen del espectro de reflectancia típico en una planta sana y estresada (A) (adaptado de Verhulst & Govaerts, 2010) y del suelo, agua y vegetación (B) (adaptado de Sishodia et al., 2020).....	22
Figura 3.8. Principio de funcionamiento del sensor de pinza foliar. Los puntos 1,3,4,5 y 6 indican las longitudes de onda empleadas para la excitación y el punto 2 las de emisión (ForceA, 2024).....	23
Figura 3.9. Imágenes térmicas (K) de cámara portátil en melocotoneros bajo distintos programas de condiciones de riego (Ramírez-Cuesta et al., 2022).....	23
Figura 3.10. Imagen de dendrómetro (a) y sensor de hoja (b) (Seedmech, 2024) .	25
Figura 3.11. Estación meteorológica (semios, 2024) (a) y sensor meteorológico en el dosel (b) (CropVue, 2024).....	25
Figura 3.12. La cámaras trampa de CropVue con un panel solar para cargar la batería (a). Imagen del papel adhesivo y atrayente de una trampa electrónica (b) (CropVue, 2024). Cámara trampa de Trapview con papel autoadhesivo de repuesto, un panel solar y un nodo meteorológico (c) (Trapview, 2024) .....	26

Figura 3.13. Monitoreo de redes de sensores inalámbricos (WSN) basada en computación en la nube modificado de (Wei et al., 2023) .....	29
Figura 3.14. Mapas de variabilidad en fertilidad de fosforo (izq.) y potasio (der.) en suelos, y programa de fertilización en libras según zonas en frutales (Kate Prengaman, 2024) .....	35
Figura 3.15. Sistema basado en mapas de prescripción para variar la dosis de aplicación de insumos agrícolas (adaptado de Ess et al., 2001) .....	36
Figura 3.16. Diagrama esquemático de medición de la densidad del dosel con el sensor ultrasónico (a) (adaptado de Palleja & Landers, 2015) y pulverizador de aplicación de dosis variables (b) (adaptado de Osterman et al., 2013) .....	37
Figura 3.17. Mapas de prescripción de fertilización. Las dosis variables, clasificadas en rangos, se generaron en función de la producción superficial de la cosecha de la temporada anterior (Liakos et al., 2020).....	39
Figura 3.18. Mapa de distribución espacial del tratamiento de pulverización. (izq.) mapa de flujos prescritos; (der.) mapa de mediciones del caudalímetro (Rovira-Más et al., 2024).....	41
Figura 3.19. Mapa de numero de capturas por trampa (izq.) y mapa de riesgo donde el color indica las áreas según la necesidad de aplicación de insecticidas (der.) (Miranda et al., (2019) .....	42
Figura 3.20. Etapas de un ACV según ISO 14040:2006 .....	48
Figura 3.21. Modelos de ciclo de vida en ACV (adaptado de Ecochain, 2024) .....	49
Figura 3.22. Concepto de la matriz de Pedigree (adaptado de Citroth, 2009) .....	54
Figura 3.23. Etapas de la evaluación de impacto ACV (adaptado de Yang et al., 2019) .....	55
Figura 3.24. Esquema general de la Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida, donde se vincula los resultados del inventario de ciclo de vida a través de las categorías impacto de punto medio con las categorías de impacto de punto final (adaptado de UNEP, 2011) .....	61
Figura 3.25. Relaciones entre los elementos de la fase de interpretación con las demás fases del ACV (adaptado de Laurent et al., 2020) .....	65
Figura 3.26. Tipos de análisis de costes de ciclo de vida y sus alcances (adaptado de UNEP, 2011).....	69
Figura 3.27. Marco conceptual del CCV ambiental (adaptado de Rebitzer & Hunkeler, 2003).....	70
Figura 3.28. Recolección de datos e interrelaciones en ACV-social (adaptado de UNEP-SETAC, 2009).....	77

Figura 3.29. Enfoque genérico indicando la contribución en horas de riesgo de trabajo infantil detallado por procesos en la producción de motores de vehículos y sus partes, utilizando información de base datos (Ciroth et al., 2013) .....	78
Figura 3.30. Desarrollo de la etapa de objetivo y alcance en un ACV social (adaptado de Benoît et al., 2020).....	79
Figura 3.31. Pasos para identificar la unidad funcional (Adaptado de Benoît et al., 2020) .....	82
Figura 3.32. Estructura metodológica ASCV para el diseño sostenible (adaptado de Wilson et al., 2023).....	96
Figura 3.33. Límites de sistema del ASCV (adaptado de Yang et al., 2019) .....	97
Figura 3.34. Esquema grafico del panel de sostenibilidad del ciclo de vida (Finkbeiner et al., 2010).....	98
Figura 3.35. Ejemplo de esquema de ponderación en ASCV, presentado por (Finkbeiner et al., 2010).....	99
Figura 3.36. Triángulo de las tres esquinas de la sostenibilidad (Omran et al., 2021) .....	100
Figura 3.37. Distribución de las publicaciones en ASCV entre los años 2020-2024 .....	101
Figura 3.38. Esquema de uso de la tabla Input-Output multirregional ampliado ambientalmente (adaptado de EXIOBASE, 2015) .....	110
Figura 3.39. Impactos medioambientales globales (huella de carbono) asociados al consumo final de los grupos de producto (adaptado de EXIOBASE, 2015) ....	110
Figura 4.1. Diagrama del ciclo de vida que describe la estructura, los procesos y los límites del sistema de producción de nectarina .....	118
Figura 4.2. Comparación entre métodos de los procesos con mayor contribución porcentual en la huella de carbono a lo largo del ciclo de vida. *Otros procesos: corresponden con el grupo de procesos no especificados cuya contribución individual a la huella de carbono es inferior al 3% .....	132
Figura 4.3. Histograma de la distribución de probabilidad de la huella de carbono en kg CO <sub>2</sub> eq por unidad funcional, resultante del análisis de incertidumbre. Las líneas continuas verticales de color rojo en los extremos muestran los límites del intervalo de confianza del 95%.....	134
Figura 4.4. Envase con melocotón troceado.....	137
Figura 4.5. Contribución del valor añadido por cada producto a las horas total de empleo (izquierda) y a las horas de trabajo vulnerables (derecha), en cada etapa del ciclo de vida .....	141

Figura 4.6. Horas de riesgo medio para cada categoría social en cada etapa del ciclo de vida .....	141
Figura 4.7. Diagrama de las etapas del ciclo de vida y límites del sistema para el producto de nectarinas utilizando el enfoque de cuna a puerta de la finca ....	147
Figura 4.8. Contribución porcentual por subetapa y proceso en cada categoría de impacto considerando el escenario de agricultura convencional (arriba) y el escenario de AP (abajo). (1) Producción de insumos, (2) establecimiento del cultivo, (3) producción del cultivo.....	154
Figura 4.9. Impacto ambiental según la metodología de puntuación única EF3.0 de la fase de producción de insumos necesarios para el cultivo y producción de nectarinas utilizando prácticas de agricultura convencional con aplicación uniforme de insumos (UA) y de AP con aplicación variable (VA) de insumos....	155
Figura 4.10. Ciclo de vida de la fruta de hueso con el alcance de la cuna al fin de vida. Se destaca en amarillo el alcance del estudio en la etapa de producción del cultivo (alcance de puerta a puerta).....	158
Figura 4.11. Costes de cada categoría de inventario para el escenario convencional y el de AP por unidad funcional (1kg de nectarinas) .....	166
Figura 4.12. Riesgo medio hora equivalente por unidad funcional (UF=1 kg nectarinas) para cada categoría de impacto social en el escenario de agricultura convencional (arriba) y de AP (abajo) .....	168
Figura 4.13. Representación gráfica de los resultados de la Análisis de la sostenibilidad del ciclo de vida (ASCV) entre los escenarios de Agricultura Convencional y de Precisión .....	169

## Lista de Tablas

Tabla 2.1. Trabajos de investigación.....	9
Tabla 3.1. Características de sensores ópticos para la gestión de N en cultivos (adaptado de Padilla et al., 2018).....	21
Tabla 3.2. Porcentaje de reducción del uso de fertilizantes al implementar tecnologías de aplicación variable frente a la aplicación uniforme en el cultivo de frutales según diferentes investigaciones.....	39
Tabla 3.3. Porcentaje de reducción del uso de fitosanitarios al implementar tecnologías de aplicación variable frente a la aplicación uniforme en el cultivo de frutales.....	43
Tabla 3.4. Porcentaje de reducción del agua de riego al implementar tecnologías de aplicación variable o riego de precisión frente a las estrategias de riego tradicional en el cultivo de frutales.....	45
Tabla 3.5. Principales bases de datos genéricas y del área agrícola .....	51
Tabla 3.6. Resumen de las categorías e indicadores de impacto ambiental del método EF3.1.....	57
Tabla 3.7. Revisión bibliográfica de ACV ambiental en sistemas de producción de fruta de hueso. Unidad funcional 1 kg de fruta.....	66
Tabla 3.8. Revisión bibliográfica de análisis de costes de ciclo de vida en el sector agroindustrial.....	74
Tabla 3.9. Lista de categorías de partes interesadas y subcategorías de impacto (Benoît et al., 2020) .....	81
Tabla 3.10. Lista de bases de datos social más relevantes .....	84
Tabla 3.11. Escala de referencia con valores/información de referencia (adaptado de Goedkoop et al., 2018).....	88
Tabla 3.12. Escala genérica de referencia ascendente (izquierda), y escala genérica de referencia descendente, para evaluación de riesgo social (derecha) (Adaptado de Goedkoop et al., 2018).....	89
Tabla 3.13. Referencias bibliográficas sobre el ACV social en el sector agroindustrial.....	92
Tabla 3.14. Resumen de estudios aplicando ASCV en el área agroindustrial....	101
Tabla 3.15. Esquema de una tabla IO (adaptado de Lenzen, 2000).....	108
Tabla 3.16. Revisión bibliográfica de análisis Insumo-Producto ambientalmente extendido (EEIOA) en el sector agroindustrial .....	111
Tabla 4.1. Inventarios material-energéticos y económicos de la producción de nectarina por unidad funcional (1 kg de fruto) en la etapa de aguas arriba. El	

porcentaje representa el aporte total por etapa y subetapa. p: abreviatura de piezas en inglés.....	120
Tabla 4.2. Inventario material-energético y económico de la producción de nectarina por unidad funcional (1 kg de fruto) en la etapa central. El porcentaje representa la contribución total por etapa y subetapa. p: abreviatura de piezas en inglés.....	122
Tabla 4.3. Inventario material-energético y económico de nectarinas por unidad funcional (1 kg de fruta) en la etapa de aguas abajo. El porcentaje representa el aporte total por etapa y subetapa .....	123
Tabla 4.4. Resultados de la huella de carbono (kg CO <sub>2</sub> eq) por unidad funcional calculada con metodologías ACV y EEIOA en la etapa aguas arriba .....	127
Tabla 4.5. Resultados de la huella de carbono (kg CO <sub>2</sub> eq) por unidad funcional calculada con ACV y EEIOA en la etapa central .....	128
Tabla 4.6. Resultados de la huella de carbono (kg CO <sub>2</sub> eq) por unidad funcional calculada con ACV y EEIOA en la etapa aguas abajo .....	130
Tabla 4.7. Resultados del cálculo de la huella de carbono (kg de CO <sub>2</sub> eq por UF) mediante las metodologías EEIOA y ACV según etapas y subetapas. También se presenta el valor de la ratio de la huella de carbono del EEIOA frente al ACV. Los valores marcados en rojo indican los máximos.....	131
Tabla 4.8. Descripción de cada etapa y proceso del ciclo de vida de la melocotón, junto con los agentes involucrados en la cadena de valor y el porcentaje de contribución económica .....	138
Tabla 4.9. Evaluación de los indicadores sociales de la empresa .....	143
Tabla 4.10. Análisis del inventario del ciclo de vida relacionado con una UF en los escenarios AC y AP.....	150
Tabla 4.11. Resumen de costos de insumos de los escenarios de agricultura convencional (AC) y de aplicación precisión (AP) por unidad funcional (UF= 1 kg de fruta). El ahorro de insumos se calcula como $(AP-AC)/AC \cdot 100$ .....	151
Tabla 4.12. Impactos ambientales de la producción de nectarinas, según categoría de impacto, en el escenario de AC con aplicación uniforme (AU) y de AP con aplicación variable (AV), por unidad funcional (UF = 1 kg de fruta). Dif %: reducción porcentual al comparar AP vs AC calculada como $(AP-AC)/AC \cdot 100$ .....	152
Tabla 4.13. Elementos empleados para el manejo sitio-específico .....	160
Tabla 4.14. Inventario de ciclo de vida por unidad funcional (1 kg de fruta) en los escenarios de AP y AC. Se presenta la diferencia porcentual (Dif) de insumos entre escenarios $(Diferencia (\%))=(AP-AC)/AC \cdot 100$ .....	161

Tabla 4.15. Análisis de impacto ambiental del escenario de AC y de AP por unidad funcional (UF=1 kg nectarinas) y categoría de impacto. Se presenta la diferencia porcentual de las categorías analizadas entre escenarios (Diferencia (%)=(AP-AC)/ACx100); y el porcentaje sobre el total del impacto asociado a la implementación y uso de las tecnologías asociadas a la AP ..... 164

## Lista de Ecuaciones

Ecuación 3.1. Índice de estrés hídrico de cultivo (Jones et al., (2002). .....	24
Ecuación 3.2. Matriz inversa de Leontief (Leontief, 1970). .....	109
Ecuación 4.1. Costos de compra. ....	163

## Abreviaturas y Acrónimos

AC	Agricultura Convencional
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
ACV-A	Análisis de Ciclo de Vida Ambiental
ACV-S	Análisis de Ciclo de Vida Social
AD	Agricultura Digital
AICV	Análisis de inventario de ciclo de vida
AP	Agricultura de Precisión
ASCV	Análisis de Sostenibilidad de Ciclo de Vida
AU	Aplicación uniforme
AV	Aplicación Variable
CCV	Coste del Ciclo de Vida
CVAS	Contenido Volumétrico de Agua en el Suelo
CWSI	Crop Water Stress Index
ECa	Conductividad Eléctrica Aparente
EEIOA	Environmental Extended Input Output Analysis
EF	Environmental Footprint
EICV	Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida
ET <sub>0</sub>	Evapotranspiración de referencia
ETc	Evapotranspiración del cultivo
ETc adj	Evapotranspiración del cultivo ajustado
FDR	Frequency Domain Reflectometry
GEI	Gases Efecto Invernadero
GNSS	Sistemas Globales de Navegación por Satélite
GPR	Ground-penetrating radar
GPRS	General Packet Radio Service
GWP	Global Warming Potential
HC	Huella de Carbono
ICV	Inventario del Ciclo de Vida
ID	Indicadores de desempeño
IOA	Input-Output Analysis
IOT	Input-Output Tables
ISO	International Organization for Standardization

LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Cost
LoRaWAN	Low Range Wide Area Network
MCDA	Método de Análisis de Decisiones Multicriterio
MRIOA	Análisis Input-Out multirregional
NVDI	Índice de vegetación de diferencia normalizada
ODS	Objetivo Desarrollo Sustentable
PCR	Product Category Rules
PRDs	Puntos de Referencia de Desempeño
PSIA	Análisis de Impacto Social de Producto
PSILCA	Product Social Impact Life Cycle Assessment
RD	Riego deficitario
RTK	Real-Time Kinematic
SHDB	Social Hotspots Database
SIG	Sistemas de información geográfica
TDR	Time Domain Reflectometry
TIC	Tecnologías de la Información y la Comunicación
UF	Unidad Funcional



# 1 Introducción

## 1.1 El sector de la fruta de hueso

En España el sector agroalimentario representa en torno al 8,9% del producto interno bruto, generando el 11,3% del empleo en 2023, con casi 2,4 millones de ocupados, un 0,3 % más que el año anterior. En cifras globales, España se consolida como la cuarta economía agroalimentaria de la Unión Europea, aportando el 12,2 % del valor agregado bruto comunitario del sector. El sector agroalimentario español es el principal productor de cítricos, con una cuota de mercado del 53,6 %, aceite de oliva (41,7 %), y frutas frescas (19,7 %) (Ivie, 2024).

En 2023, el sector agroalimentario aportó el 18,5 % del valor de las exportaciones de bienes totales de España. El principal mercado de los productos agroalimentarios españoles es la UE-27, que concentra el 67,8 % de las exportaciones, 2,9 puntos porcentuales por encima del año previo. Fuera de Europa, destaca la caída de un 25,8 % en las exportaciones a China, lo que consolida, por tercer año consecutivo, a Estados Unidos como el segundo mayor destino extra-UE, solo por detrás de Reino Unido (Ivie, 2024).

El melocotón y la nectarina son los cultivos de fruta de hueso más importantes en España, con una superficie de producción de 70.094 ha (MAPA, 2024). En España, son las Comunidades de Aragón, con un 28%, y Murcia, con un 27%, las que lideran la producción nacional de melocotones. En la producción de nectarinas Aragón también lidera con un 32 %, seguida de Cataluña con un 29 % y la región de Murcia con un 16 % (MAPA, 2022).

La Figura 1.1. muestra la evolución de la producción de los principales frutales en España en el periodo 2018-2023. Se observa en las temporadas 2020, 2021 y 2022, un descenso significativo de producción con menos de 2 millones de toneladas en la fruta de hueso. En España, la temporada 2023 alcanzó la producción cercana a 1,5 millones de toneladas de melocotones, nectarinas y paraguayos, un 12% superior a la media del 2018/2022. Las previsiones de producción de fruta de hueso para la campaña 2024 indican que aumentará un 4% respecto a 2023 y del 7% respecto a la media del 2018/2022 (FEPEX, 2024).

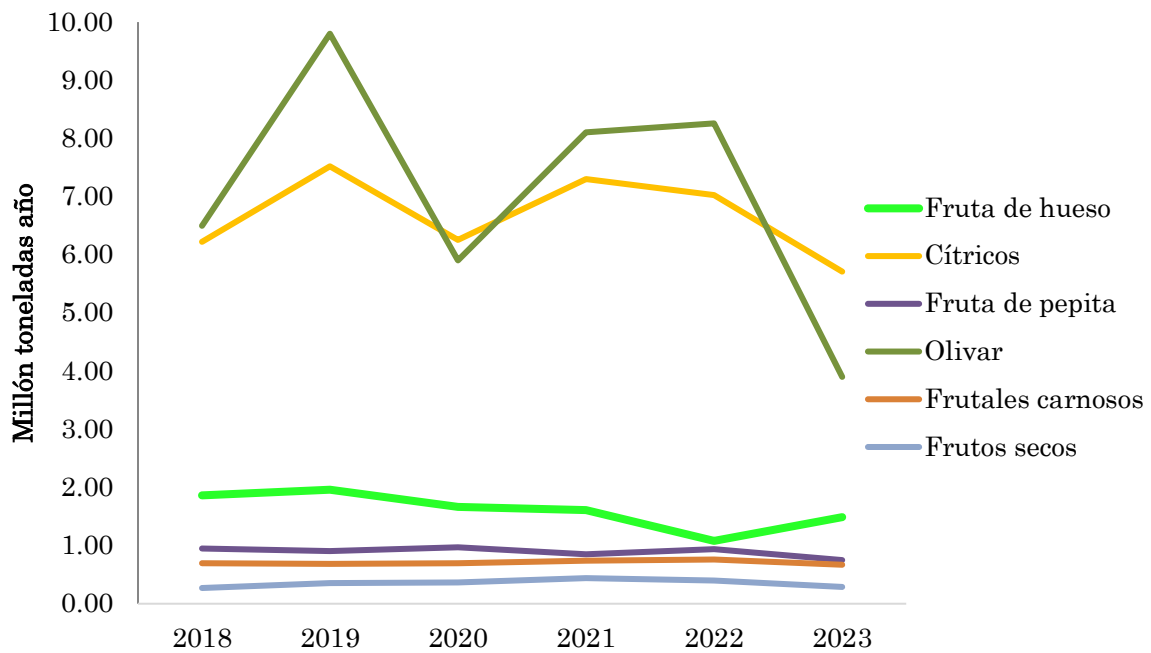


Figura 1.1. Producción de fruta en España (millones de toneladas por año) (MAPA, 2024)

## 1.2 Crisis en el sector productivo

El sector agrícola en general se encuentra actualmente inmerso en una crisis originada en tres áreas principales:

- En el ámbito económico, se ha registrado un aumento histórico en los precios de los insumos y servicios esenciales para la producción agrícola. En tan solo un año, se ha experimentado un incremento del 89,57% en los costos de la energía en comparación con el año anterior. Además, los fertilizantes simples nitrogenados han aumentado en un 25,69%, los fertilizantes compuestos en un 75,72%, y los productos fitosanitarios han visto un incremento del 18,14% (Roitbarg, 2021).
- En lo que respecta al aspecto medioambiental, el sector se enfrenta a dos desafíos críticos. En primer lugar, el cambio climático, según los resúmenes climáticos (MITECO, 2023), el año 2022 se situó como el más cálido registrado desde 1961, superando en 0,7 °C el récord previo de 2020. Ese año se caracterizó por un calentamiento extremo, con una temperatura promedio en la España peninsular de 15,4 °C, representando un aumento de 1,7 °C en comparación con la media del periodo de referencia 1981-2010. El aumento de las temperaturas medias y la reducción de las horas de frío afectan negativamente la fenología de los frutales de hueso, dificultando la ruptura de la dormancia. El cambio climático también es el responsable de las pérdidas por heladas tardías y temperaturas anormalmente altas al inicio de la primavera (Egea et al., 2022). Además, el año

2022 se caracterizó por un déficit significativo de precipitaciones, con un promedio de 536 mm en la España peninsular, equivalente al 84 % del valor normal del periodo de referencia 1981-2010. La escasez de agua es un problema significativo en áreas semiáridas como Murcia. La necesidad de mejorar la gestión del riego ha llevado a la implementación de estrategias de riego deficitario regulado para optimizar el uso del agua sin comprometer significativamente el rendimiento y la calidad de la fruta de hueso (Mirás-Avalos et al., 2016).

El segundo factor se relaciona con el impacto de la agricultura intensiva, que ha convertido a España en el principal consumidor interno de agua en la UE-28, representando el 60% de todo el impacto asociado al consumo de agua en el país. Además, se ha registrado un incremento del 5,0% en los indicadores de ecotoxicidad de agua dulce y un aumento del 12,3% en la eutrofización marina. Estos datos contrastan con la tendencia promedio en la UE-28, que experimentó una disminución del 9,5% en la ecotoxicidad de agua dulce y una reducción del 7,5% en la eutrofización marina (MINCON/EC-JRC, 2022). Además, la dependencia de los productores del uso de pesticidas y la falta de capacitación en la aplicación adecuada de estos productos representan un riesgo tanto para la salud humana como para el medio ambiente.

Desde la perspectiva social, el sector agroalimentario experimenta una transformación impulsada por los consumidores y sus preferencias en las decisiones de compra. Cada vez más, se preocupan por las condiciones de producción de los alimentos y si su adquisición tiene consecuencias no deseadas en términos medioambientales y socioeconómicos. Según una encuesta realizada por el Observatorio de Sostenibilidad y Consumo en 2022, el 63% de los españoles muestra preocupación por el cambio climático y sus ramificaciones. Además, la encuesta indica que 1 de cada 2 españoles considera la sostenibilidad al tomar decisiones de compra de productos o contratación de servicios (Cetelen, 2023).

Para hacer frente a los desafíos que plantea la producción de fruta de hueso en España se requiere una combinación de investigación continua, innovación en prácticas de cultivo y una mejor gestión de los recursos. Las líneas de investigación y actividades de innovación desarrolladas en la Región de Murcia relacionadas con la fruta de hueso se enfocan en atender necesidades en diferentes áreas, como el control de heladas, la protección de cultivos, el mejoramiento genético, el aclareo, la adopción de tecnologías avanzadas de monitoreo con sensores y modelos predictivos para el riego, fertilización, y la aplicación de fitosanitarios (ver Figura 1.2.) (Cos Terrer, 2017).

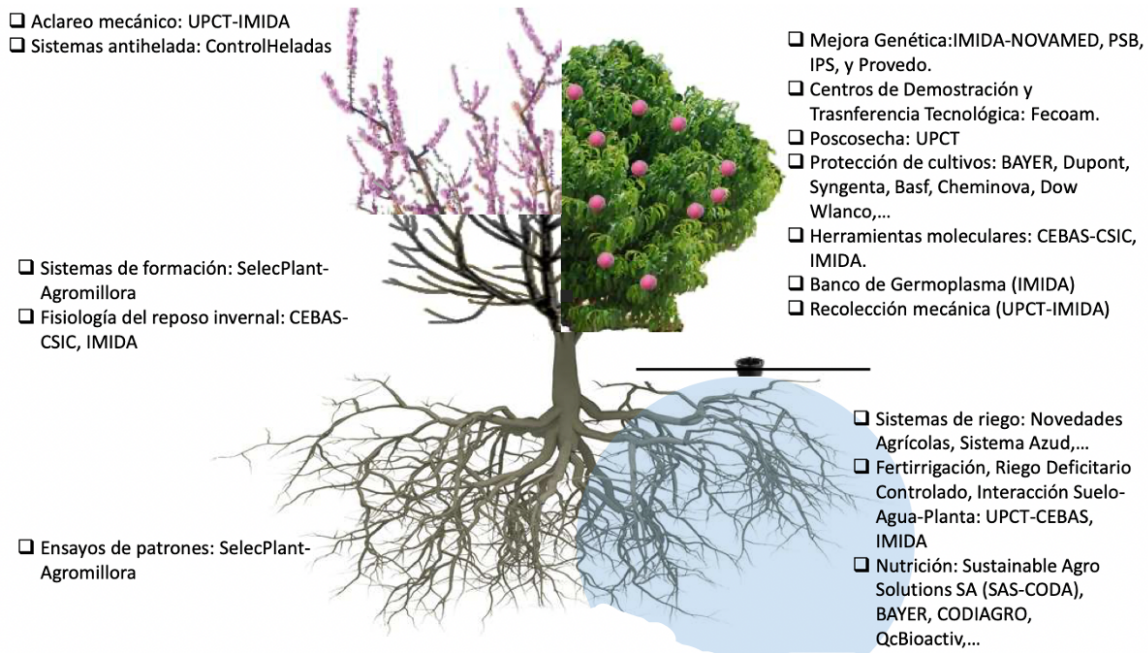


Figura 1.2. Líneas de investigación y desarrollo en fruta de hueso, e instituciones a cargo en la Región de Murcia (Cos Terrer, 2017)

### 1.3 La sostenibilidad como paradigma productivo

El informe de Brundtland de 1987, originalmente titulado "Nuestro Futuro Común", elaborado por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) (Visser & Brundtland, 1987), define el "Desarrollo Sostenible" como la capacidad de satisfacer las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer las oportunidades de las generaciones futuras. En este contexto, cuando se habla de "la sostenibilidad como paradigma productivo", nos referimos a un enfoque integral y transformador en la producción de bienes y servicios que busca equilibrar el crecimiento económico, la equidad social y la protección ambiental. Este paradigma se basa en la premisa de que las prácticas de producción deben ser sostenibles a largo plazo.

En las últimas décadas se ha desarrollado una metodología conocida como Análisis de Sostenibilidad de Ciclo de Vida (ASCV), que tiene como objetivo comprender el impacto de la producción de bienes y servicios integrando las áreas medioambiental, económica y social (UNEP, 2011). La sostenibilidad de un producto se refiere a la capacidad de un producto para minimizar su impacto ambiental, social y económico a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final. Para evaluar esta sostenibilidad, se utilizan metodologías basadas en el enfoque de ciclo de vida, que incluyen el

Análisis de Ciclo de Vida Ambiental (ACV-A), el Coste del Ciclo de Vida (CCV) y el Análisis de Ciclo de Vida Social (ACV-S).

El ACV-A, evalúa los impactos ambientales asociados a todas las etapas del ciclo de vida de un producto. Esta metodología ha sido ampliamente utilizada durante décadas y permite identificar áreas de mejora en términos de eficiencia y reducción de emisiones (Kaebernick et al., 2003). La metodología CCV se centra en los costos económicos totales asociados a un producto a lo largo de su ciclo de vida, y permite evaluar la rentabilidad y la eficiencia económica de diferentes alternativas (Klöpffer, 2003). El ACV-S es una metodología más reciente y en desarrollo que evalúa los impactos sociales a lo largo del ciclo de vida del producto. Incluye aspectos como las condiciones laborales, la equidad social y el bienestar comunitario (Lacasa et al., 2016).

La aplicación de estas metodologías permite realizar un análisis exhaustivo del ciclo de vida de los sistemas productivos, facilitando la evaluación de disparidades en el impacto económico, ambiental y social. Por ejemplo, la elección de insumos puede variar significativamente en función de su origen, método de transporte, forma de utilización, costos y toxicidad para los trabajadores, entre otros factores. Esta capacidad de comparación simplifica la selección de alternativas más sostenibles en las tres áreas mencionadas, permitiendo a las empresas optar entre sistemas convencionales y aquellos que incorporan innovaciones tecnológicas (Gmelin & Seuring, 2014).

Así aparece el concepto de "innovación sostenible" (ver Figura 1.3.) que se refiere al desarrollo y aplicación de nuevas ideas, productos, servicios, procesos y tecnologías que contribuyen al crecimiento económico, la protección ambiental y el bienestar social de manera equilibrada y a largo plazo (De Luca et al., 2018).

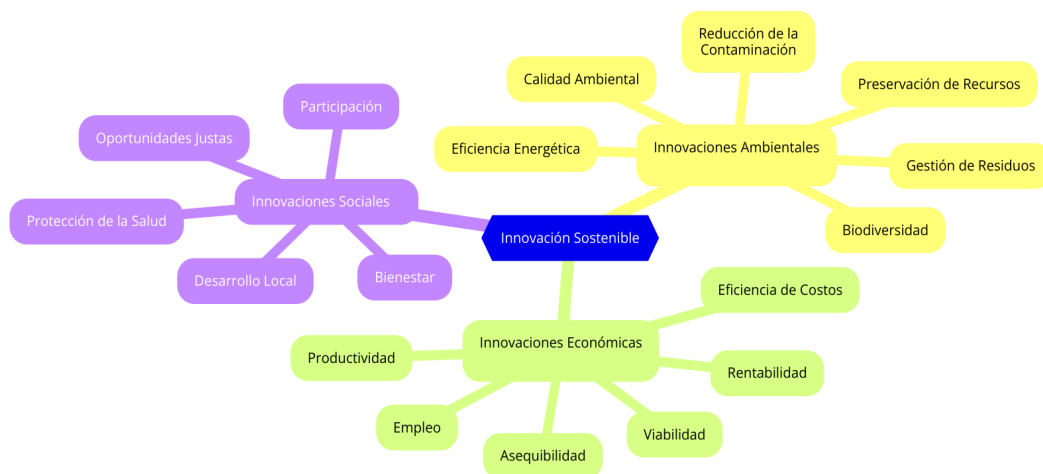


Figura 1.3. Desarrollo del concepto de innovación sostenible, modificado (adaptado de De Luca et al., 2017)

Las evaluaciones del ciclo de vida en la producción de fruta revelan que las actividades como la refrigeración, las operaciones agronómicas, el riego y el uso de fertilizantes son las que presentan mayor impacto al medio ambiente. Estas evaluaciones sugieren la necesidad de innovaciones asequibles que hagan la producción primaria más eficiente y menos intensiva en recursos (Medici et al., 2020). La innovación tecnológica mediante las técnicas de agricultura de precisión (AP) y la agricultura digital (AD) son actualmente una potente solución para mitigar el impacto ambiental de los sistemas agrícolas (Bacenetti et al., 2020). Contribuyen a una utilización precisa y optimizada de los insumos agrícolas (fertilizantes, productos fitosanitarios y agua) mediante la aplicación variable (Zude-Sasse et al., 2016), que también redundará en una reducción de los costes (Heege, 2013).

El desarrollo de nuevas tecnologías de AP y AD y su aplicabilidad como estrategia más sostenible en la producción de fruta de hueso requiere un respaldo cuantitativo a través del análisis de sostenibilidad. El propósito es evaluar el impacto integral del sistema productivo bajo análisis en el área ambiental, económica y social a lo largo de todo el ciclo de vida, fomentando la toma de decisiones más conscientes y sostenibles para el futuro del sector de la fruta de hueso.

## 2 Hipótesis, objetivos y estructura de tesis

### 2.1 Hipótesis

La hipótesis de partida de esta tesis es que el nuevo conocimiento logrado a través de la fusión de indicadores ambientales, económicos y sociales en todas las etapas de la cadena de suministro del sector de frutas y verduras frescas permitiría mejorar la eficiencia de nuestra industria. Además, la implementación de tecnologías específicas, como la integración de la agricultura de precisión-digital, contribuiría a la mejora de la sostenibilidad de la industria de frutas y verduras frescas.

### 2.2 Objetivo general y objetivos específicos

Esta tesis se ha desarrollado en el marco del proyecto de I+D+i “Optimización de la cadena de valor del sector hortofrutícola desde una perspectiva holística: ACV ambiental, social y económico (Karp0-LIFE)”, de la convocatoria de 2018 del plan estatal y en colaboración con una empresa productora de fruta de hueso localizada en la región de Murcia.

En este marco los retos de investigación de esta tesis pretenden contribuir al desarrollo sostenible de los sistemas de producción de fruta de hueso. Para ello se plantea como objetivo general cuantificar el impacto del ciclo de vida del sistema productivo de fruta de hueso utilizando la metodología de ACV e incluyendo aspectos ambientales, económicos y sociales del sistema productivo para optimizarlo mediante la utilización de tecnologías. Para alcanzar este objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Estudiar el impacto ambiental (huella de carbono) y económico de la cadena de valor de la fruta de hueso producida en el sureste de España mediante dos enfoques metodológicos: el ACV convencional y el enfoque econométrico EEIOA.
2. Evaluar el impacto social de un sistema de producción de melocotón envasado y listo para el consumo, empleando la metodología de ACV social.

3. Estimar el impacto ambiental y económico mediante ACV de los sistemas de producción de fruta de hueso empleando técnicas de agricultura convencional y de precisión en el sureste de España.
4. Evaluar el impacto ambiental, económico y social de implementar agricultura de precisión-digital a partir de datos reales en sistemas de producción de fruta de hueso en la región de Murcia, utilizando el análisis de sostenibilidad de ciclo de vida.

## 2.3 Estructura de tesis

La tesis sigue las normas establecidas para la redacción y depósito de tesis del programa de doctorado. Su estructura inicia con un capítulo dedicado a la introducción y el planteamiento del problema, seguido de este capítulo enfocado en los objetivos de la investigación, y continúa con la revisión bibliográfica. Esta última está compuesta por la descripción del estado del arte en dos áreas principales. La primera aborda el escenario de la AP y AD, describiendo las principales tecnologías utilizadas y sus beneficios en la producción actual de frutas. La segunda área se centra en el análisis del ciclo de vida para evaluar los impactos ambientales, económicos y sociales, mediante la descripción de diversas metodologías según el área de sostenibilidad en estudio.

A continuación, la estructura tradicional de la tesis se ajusta a los principios establecidos por las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, que definen la metodología para el ACV. Esta metodología propone cuatro etapas iterativas: 1) Definición de objetivos y alcance, 2) Análisis de inventario del ciclo de vida, 3) Evaluación de impacto del ciclo de vida, y 4) Interpretación del ciclo de vida. Para cada uno de los trabajos resultantes de esta tesis, estas cuatro etapas se describen en el capítulo 4 que recibe el nombre genérico de resultados. De manera general, en cada uno de estos estudios las dos primeras etapas del ACV “Definición del alcance y objetivo” y “Análisis del inventario del ciclo de vida” corresponden a la sección de Materiales y métodos, mientras que los apartados “Evaluación del impacto”, y la etapa de “Interpretación” equivalen a la sección de Resultados y Discusión. Además, en este capítulo de resultados se incluyen las conclusiones específicas por estudio.

Como ya se ha mencionado, la composición del capítulo 4 de resultados se desarrolla en torno a cuatro estudios que están interrelacionados y centrados en el ACV de sistemas productivos en el sector de fruta de hueso en distintas áreas de la sostenibilidad, que se abordan por separado o en conjunto. La Tabla 2.1. muestra

las características de cada trabajo, se indica la unidad funcional, el alcance del estudio, el origen del inventario, las metodologías utilizadas y los escenarios analizados. Los estudios están interconectados, evolucionando en el análisis de escenarios desde un enfoque amplio (*cradle to gate*) a uno más detallado (*gate to gate*), apoyándose en los resultados previos que van señalando que etapa, subetapa o proceso presentan los impactos más negativos. Lo que permite ir centrando los estudios sucesivos, para una mejor identificación de los impactos y para plantear situaciones de mejoras mediante la adecuada interpretación de los resultados.

Finalmente, la tesis concluye con el capítulo de conclusiones generales y líneas futuras de investigación. Se añaden anexos, que incluyen los inventarios de los análisis realizados.

Tabla 2.1. Trabajos de investigación

Título del trabajo	Unidad Funcional	Alcance	Inventarios primarios/ secundarios	Metodología	Escenario	Publicación asociada
1. La huella de carbono de la producción de fruta de hueso: Comparación entre el análisis del ciclo de vida (ACV) y el análisis de Input-Output ambientalmente extendido (EEIOA)	1 kg de Nectarina	“Cradle to grave”	Histórico 15 años / ecoinvent	ACV-A + EEIOA	Agricultura convencional	<a href="https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135130">https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135130</a>
2. Un estudio de caso sobre la aplicación de la evaluación del impacto social de los productos al sector agroalimentario: melocotón listo para el consumo.	452g de Melocotón	“Gate to gate”	Página web y memoria de sostenibilidad / SHDB - EXIOBASE	ACV-S + PSIA	Agro industria	<a href="https://oa.upm.es/72149/1/cest2021_00795.pdf">https://oa.upm.es/72149/1/cest2021_00795.pdf</a>
3. Análisis del ciclo de vida (ACV) ambiental de la agricultura de precisión para la producción de fruta de hueso	1 kg de Nectarina	“Cradle to gate”	Histórico 15 años	ACV-A + CCV	Agricultura convencional + A. Precisión (datos bibliográficos)	<a href="https://www.mdpi.com/2073-4395/12/7/1545">https://www.mdpi.com/2073-4395/12/7/1545</a>
4. Evaluación tecnoeconómica, ambiental y social de la agricultura de precisión para la producción de fruta de hueso	1 kg de Nectarina	“Gate to gate”	Histórico 6 años	ACV-A + CCV + ACV-S	A. Convencional + A. Precisión (datos reales finca)	<a href="https://oa.upm.es/78715/">https://oa.upm.es/78715/</a> <a href="https://oa.upm.es/82265/">https://oa.upm.es/82265/</a>

## 3 Revisión bibliográfica

### 3.1 Escenario de agricultura digital o agricultura de precisión

#### 3.1.1 Evolución histórica

Desde la Revolución Agrícola del período neolítico (10.000 A.C.) hasta el siglo XIX se utilizaban tecnologías rudimentarias como el arado y la mano de obra intensiva para la subsistencia (UNESCO Archives, 2022), era lo que se denomina Agricultura 1.0 (ver Figura 3.1). La Revolución Industrial alrededor de 1850 marcó el comienzo de la Agricultura 2.0, caracterizada por el uso de tractores y cosechadoras, permitiendo una producción a gran escala con menos mano de obra (Neves et al., 2023). A mediados del siglo XX, la Revolución Verde introdujo la Agricultura 3.0 con insumos industriales, mejoramiento genético, semillas híbridas, mecanización, agroquímicos, monocultivos, especialización, rotación de cultivos y control de plagas, incrementando el rendimiento y las ganancias (FAO, 1996).

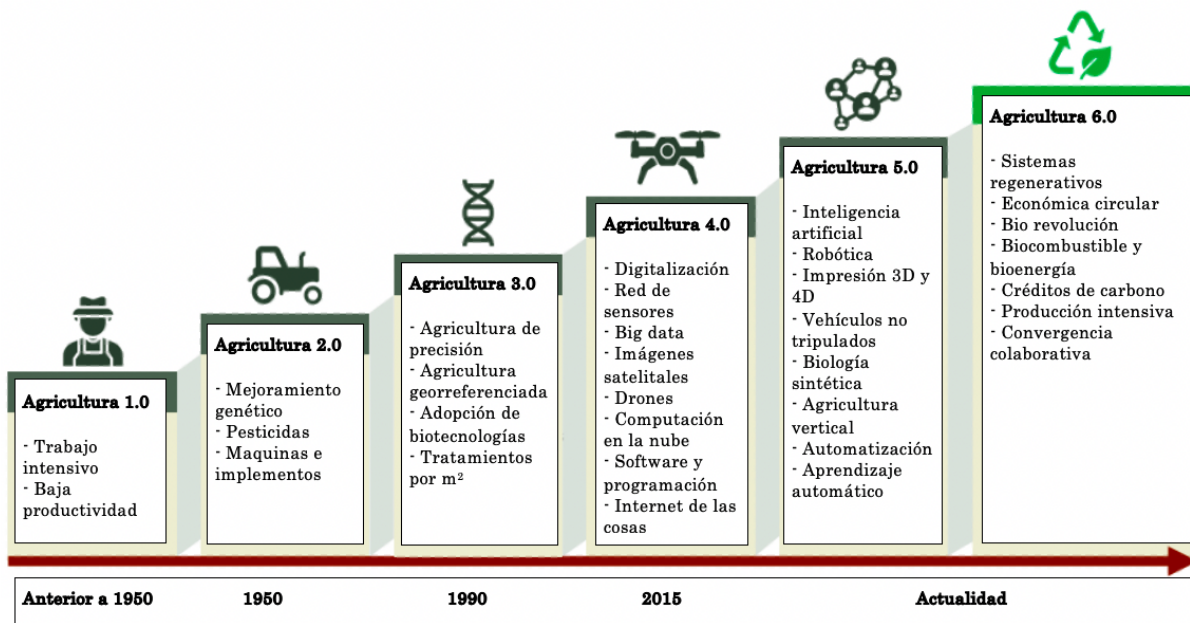


Figura 3.1. La evolución tecnológica de la agricultura a través de la historia (adaptado de Neves et al., 2023)

La Agricultura 4.0, surge entre los siglos XX y XXI, marca el inicio de la era digital en este sector al integrar tecnologías como sistemas de información, sensores, biotecnología y AP, con el objetivo de mejorar la eficiencia y optimizar el uso de recursos para aumentar la productividad (Neves et al., 2023). También conocida como Agricultura Digital o Agricultura inteligente, se asemeja a la Industria 4.0 al integrar los ámbitos físico, digital y biológico mediante tecnologías como el internet de las cosas (IoT), Big Data, conectividad ubicua (servicio de nubes) y la inteligencia artificial (IA), diseñadas para optimizar la producción agrícola en entornos rurales (Albiero et al., 2020).

La Agricultura 5.0, inspirada en la Industria 5.0 (European Commission, 2023b), representa una nueva fase de la revolución agrícola. Que busca abordar desafíos como el crecimiento demográfico, cambio climático y escasez de recursos naturales, integrando tecnología para mejorar la productividad económica y ambiental de manera integral. Incluye aspectos como cambios en hábitos alimentarios, captura de carbono, biodiversidad y uso de energías renovables (Peixoto, 2024).

La propuesta emergente de Agricultura 6.0 se vislumbra como una forma innovadora de agricultura inteligente, empleando tecnologías como robótica, inteligencia artificial, detección cuántica y comunicación 6G-IoT. Esta nueva fase se apoya en la infraestructura del 5G y promete avances significativos en la automatización y optimización de la producción agrícola (Polymeni et al., 2023; Zhang et al., 2022).

La digitalización, es una de las transformaciones tecnológicas de mayor trascendencia en esta era, que ha logrado convertirse en un punto focal para los responsables de las políticas agrícolas que buscan una solución holística y multidimensional a estos desafíos (Basso & Antle, 2020; FAO, 2020; OECD, 2019).

### **3.1.2 Agricultura de precisión vs Agricultura digital**

La digitalización agrícola en la Unión Europea se enfoca en modernizar, hacer más competitivo y sostenible el sector agrícola mediante la adopción de tecnologías digitales, la mejora del acceso al conocimiento y la modernización de infraestructuras y gobernanza, para una producción más eficiente, sostenible y competitiva, reduciendo la huella ambiental y mejorando el desarrollo rural (Comisión Europea, 2023).

Según lo definido por la Sociedad Internacional de AP:

La AP es una estrategia de gestión que recopila, procesa y analiza datos temporales, espaciales e individuales, y los combina con otra información para apoyar las decisiones de gestión de acuerdo con la variabilidad estimada, con el fin de mejorar la eficiencia en el uso de recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agrícola (ISPA, 2024).

La AP y la agricultura digital son conceptos relacionados pero distintos en su enfoque y aplicaciones dentro de la agricultura moderna:

- Agricultura de precisión: Se enfoca en ajustar y gestionar variables agrícolas en pequeñas áreas específicas de un campo, utilizando tecnologías como sensores, sistemas de posicionamiento global (GPS), y sistemas de información geográfica (SIG). El objetivo es optimizar el uso de insumos como agua, fertilizantes y pesticidas, maximizando el rendimiento y minimizando el impacto ambiental (Gebbers & Adamchuk, 2010). Esta técnica permite aplicar insumos solo donde son necesarios, mejorando la eficiencia de recursos y la sostenibilidad (Sharma & Srushtideep, 2022).

- Agricultura digital (AD): Es un concepto más amplio que incluye la integración de tecnologías digitales como el IoT, la IA, y análisis de big data en toda la cadena de valor agrícola. Este enfoque optimiza no solo las operaciones en el campo, sino también la gestión logística, comercial y estratégica de la producción agrícola (Trivelli et al., 2019). La agricultura digital permite tomar decisiones más informadas y estratégicas mediante el análisis en tiempo real de múltiples fuentes de datos (Sendra, 2023).

La AP se centra en optimizar el uso sitio-específico o específica del sitio de insumos agrícolas, mientras que la agricultura digital es un enfoque más amplio que abarca toda la cadena productiva utilizando tecnologías avanzadas para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad del sistema agrícola (ver Figura 3.2).

En realidad, existe una línea difusa entre las definiciones de “agricultura de precisión”, “agricultura inteligente” o “agricultura digital”. Para algunos autores, la agricultura inteligente se incluye bajo la definición de AP, mientras que otros usan el término AP solo cuando se refieren a la producción o mediciones precisas. Otros la consideran en un enfoque más holístico de soluciones inteligentes para capturar datos e interpretarlos utilizando tecnologías informáticas para hacer las operaciones agrícolas más predecibles y eficientes.

En general, todas se refieren al uso de tecnologías modernas para gestionar las explotaciones agrícolas con el fin de mejorar el rendimiento, reducir el uso de insumos y los requisitos de mano de obra humana (Avola et al., 2024).

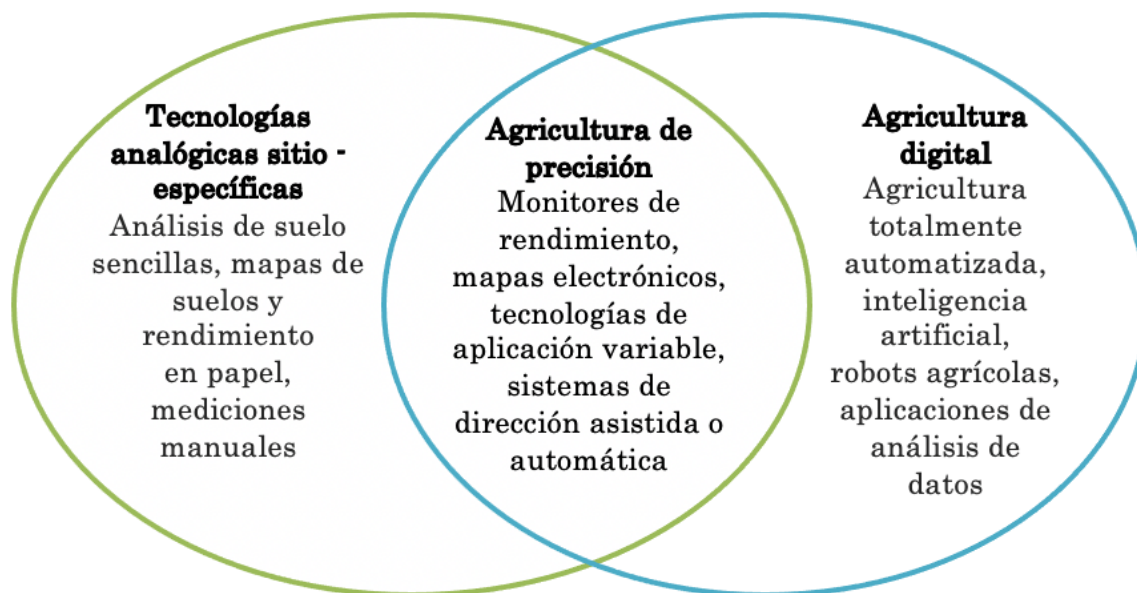


Figura 3.2. Relación entre la gestión específica del sitio, la agricultura de precisión convencional y la agricultura digital (adaptado de McFadden et al., 2023)

### 3.1.3 Tecnologías para la agricultura de precisión

En vista de lo mencionado, el enfoque de la AP se basa en la aplicación de tecnologías de ingeniería a prácticas de gestión agronómica bien establecidas. La aplicación concreta de estos principios, de hecho, depende estrictamente de innovaciones tecnológicas para adquirir, gestionar y utilizar una gran cantidad de datos necesarios. La AP se refiere a un conjunto de tecnologías que están en rápido desarrollo, las cuales proporcionan información más precisa sobre los recursos gestionados y permiten una gestión variable de los mismos.

En este sentido, ha habido diversos intentos de clasificar las tecnologías de AP (PATs en inglés). Siguiendo en este caso la clasificación de Avola et al. (2024) se consideran cuatro categorías:

- **Tecnologías de medición:** se centra en la adquisición de datos mediante tecnologías basadas en sensores locales y remotos para la de detección de la variabilidad espacial a nivel subcampo.
- **Tecnologías de información y comunicación:** se centra en la gestión de datos (compartir, intercambiar, almacenar y comunicar), el procesamiento y

análisis, y la toma de decisiones apoyada en el uso de aplicaciones móviles, modelos predictivos, o IA entre otras.

- Tecnologías de posicionamiento y guiado: proporciona los datos espaciales esenciales para llevar a cabo la gestión específica del sitio, además de información que permite que el vehículo navegue a lo largo de una ruta preestablecida dentro del campo.
- Tecnologías de reacción: dispositivos controlados por computadora que varían las aplicaciones de insumos a lo largo del campo, centrándose en tecnologías de aplicación de dosis variable.

### 3.1.4 Tecnologías de medición

En la agricultura actual se ha comprobado la importancia de mapear datos de suelos, cultivos y condiciones atmosféricas, para gestionar sosteniblemente los recursos naturales a diferentes escalas. Conocer las propiedades físicas, biológicas y químicas del suelo, y el estado fisiológico de las plantas mediante sensores es crucial para diseñar estrategias de riego, manejo de nutrientes y plaguicidas (Sishodia et al., 2020). Así, la AP utiliza la recogida intensiva de datos e información de sensores locales y remotos. Se han identificado siete tecnologías de sensores que se aplican en la AP: sensores ópticos, sensores electroquímicos, sensores de ubicación, sensores dieléctricos, sensores de flujo de aire (neumáticos), sensores acústicos y estaciones meteorológicas agrícolas. Estos sensores proporcionan datos que permiten monitorear todo el proceso agrícola en cinco áreas diferentes (siembra, gestión del suelo, gestión de nutrientes y agua, gestión de plagas y enfermedades, cosecha y procesamiento postcosecha (Avola et al., 2024).

#### 3.1.4.1 Sensores remotos

Un sensor remoto es una tecnología que permite la recolección de datos sobre cultivos y su entorno sin necesidad de contacto físico directo. Estos sensores utilizan plataformas como satélites y aviones para captar información en diversas longitudes de onda del espectro electromagnético, como el infrarrojo y el visible. Los sensores utilizados para la percepción remota tienen diferentes resoluciones tanto espacial como espectral, lo que es crucial para su utilidad. Los sensores de alta resolución espacial pueden capturar imágenes más detalladas y los de alta resolución espectral pueden capturar más información respecto a enfermedades, plagas, riego o fertilización (Mulla, 2013). La estimación del rendimiento y la biomasa de los cultivos requiere de una resolución espacial de 1 a 3 m, en cambio

para la programación de riego y fertilización de dosis variable, de 5 a 10 m. Respecto el mapeo de malezas y la aplicación variable de herbicidas, se requiere una resolución espacial más fina de 0,05 a 0,50 m (Weiss et al., 2020).

La era de la teledetección satelital para la agricultura comenzó con el lanzamiento de Landsat 1, ofreciendo imágenes para la clasificación del uso del suelo, la clasificación de cultivos y la estimación de necesidades de agua. Desde el año 2000, los nanosatélites y otros satélites como GeoEye-1, Pleiades-1A, Worldview-3, SkySat-2 y Superview-1 recopilan imágenes multiespectrales con alta resolución espacial ( $\leq 2$  m) diarias o periódicas. Los satélites con resolución espacial moderada pero alta resolución temporal, como Sentinel 2, se utilizan junto con datos de campo para apoyo en la toma de decisiones en AP (Sishodia et al., 2020). Los satélites tradicionales suelen proporcionar imágenes de menor resolución espacial y temporal en comparación con los sensores aerotransportados en aviones equipados con diversos tipos de cámaras. Pueden ofrecer una mayor flexibilidad al proporcionar imágenes con la resolución espacial y temporal necesarias para determinar manejos agrícolas específicos (Maes & Steppe, 2019).

Los sistemas de imágenes derivados de la percepción remota se clasifican en cuatro categorías principales. Las cámaras RGB/NIR, que combinan bandas de luz visible (RGB) e infrarroja cercana (NIR) para estimar la biomasa vegetal a través de índices de vegetación. Las cámaras multiespectrales, capaces de adquirir un número limitado de bandas espectrales en las regiones visible y NIR, utilizadas para monitorear cultivos y evaluar variables como biomasa, senescencia, estado nutricional y contenido de agua. Los sistemas de imágenes hiperespectrales, que adquieren cientos de bandas espectrales de forma continua en el rango VIS-NIR, permitiendo análisis detallados de la vegetación. Las cámaras infrarrojas o termográficas, empleadas para detectar estrés hídrico, enfermedades, maduración de cultivos y otros factores fisiológicos (Maes & Steppe, 2019).

#### **3.1.4.2 Sensores locales**

Los sistemas de sensores locales o próximos, brindan mediciones que representan el estado del suelo o la planta o condiciones ambientales en un momento específico. La detección proximal se utiliza ampliamente en la AP para mapear patrones. Sin embargo, la comprensión de la dinámica temporal de los sistemas de producción agrícola requieren un monitoreo continuo de los parámetros que afectan el crecimiento de los cultivos (Adamchuk et al., 2018).

Los sensores se pueden usar para inferir las propiedades de interés en ciertas condiciones del suelo o de las plantas, a partir de la cuantificación de su capacidad para conducir una carga eléctrica, reflejar la luz, emitir radiación o resistir la distorsión mecánica (Rossel & Adamchuk, 2013). A continuación, se describen algunos de los conceptos de sensores más utilizados para la detección proximal de características en suelos, plantas y ambiente.

### 1. Sensores de suelo

Para caracterizar la variación espacial del suelo, se deben recolectar y analizar muchas muestras de suelo de distintas superficies representativas. El muestreo de suelo convencional de laboratorio, generalmente es escaso y no entrega información inmediata, y a menudo no representa adecuadamente la variación presente en el campo.

En la detección proximal el sensor está en contacto directo con el suelo o cerca de él. Las mediciones se realizan en condiciones de campo, se toman de la superficie o dentro del perfil del suelo y la información se produce casi instantáneamente (Adamchuk, 2006). Los sensores pueden ser de funcionamiento estacionario (o estático) o móvil, éstos pueden tomar medidas y recopilar datos en tiempo real mientras se desplazan por el campo, generalmente montados en vehículos agrícolas, como tractores o drones con vuelo muy próximo al cultivo, lo que permite una medición continua (Rossel & Adamchuk, 2013).

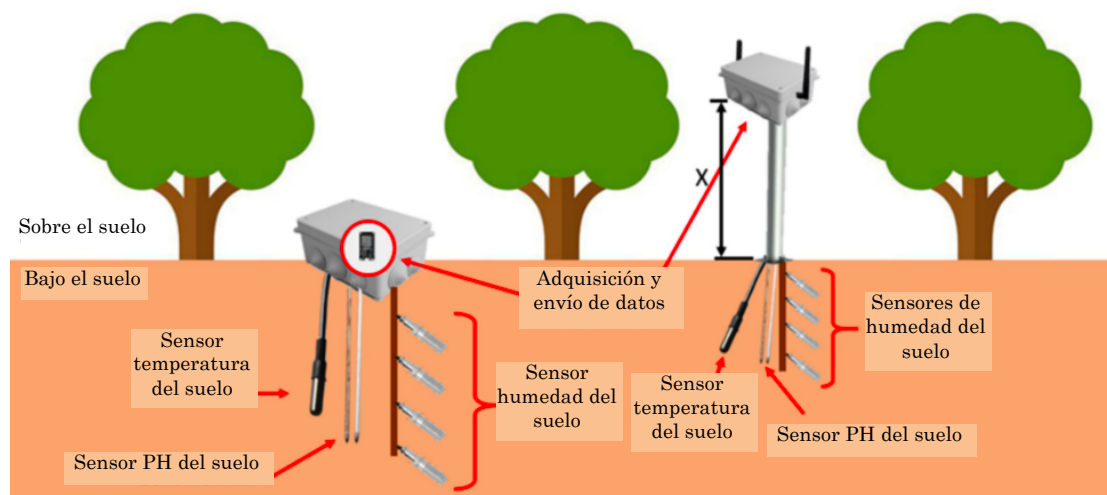


Figura 3.3. Nodo sensor de propiedades del suelo (adaptado de García et al., 2021)

Los sensores de suelo (ver Figura 3.3.) proporcionan información sobre variables físico-químicas que se pueden relacionar directamente o indirectamente con el suelo y sus propiedades. Los sensores detectan cambios en disponibilidad de agua basándose en la medición del potencial matricial del suelo ( $\psi_m$ ) o del

contenido volumétrico de agua en el suelo (CVAS). Los datos preliminares que proporcionan los sensores permiten conocer el almacenamiento máximo de agua en el suelo y cuándo las variaciones diarias en el CVAS comienzan a limitar la absorción de agua por parte de las plantas (Conesa et al., 2021). El procesamiento de estos datos permite que sistemas presurizados de riego pueden automatizarse mediante redes de sensores inalámbricos interconectadas por sistemas compuestos de dispositivos de transceptores de radiofrecuencia, sensores, microcontroladores y actuadores (Vera et al., 2017).

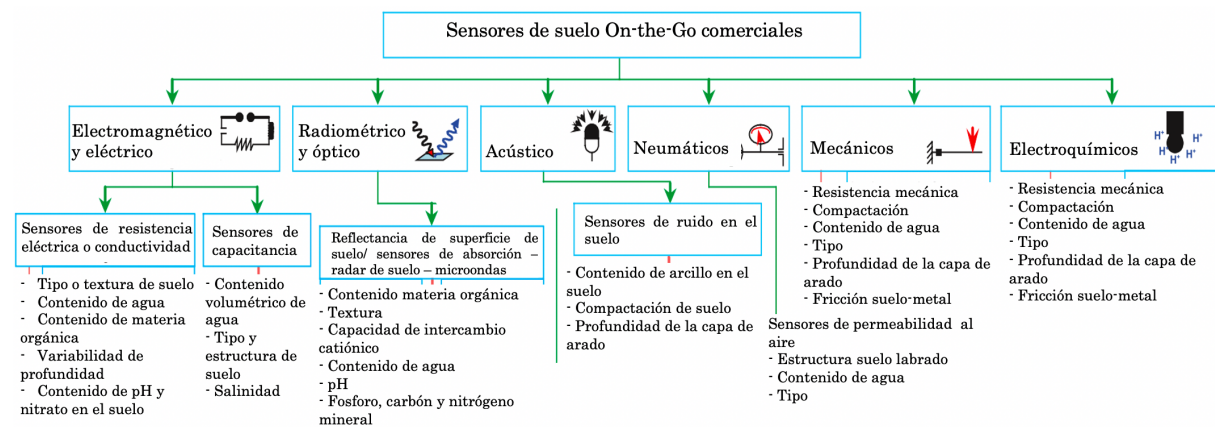


Figura 3.4. Clasificación de sensores de suelo según su funcionamiento y parámetros que miden (Las propiedades del suelo más probables de distinguir son las indicadas en fuente roja) (adaptado de Adamchuk, 2006)

A continuación, se detallan las principales tecnologías de sensores de suelo:

i) Sensores eléctricos y electromagnético

Son herramientas clave en geofísica para caracterizar las propiedades del suelo (ver Figura 3.4.). Al medir la conductividad eléctrica aparente (ECa) del suelo, estos sensores permiten obtener información valiosa sobre su composición, salinidad, acidez y otras características (USDA, 2018). La ECa es un indicador de la capacidad del suelo para conducir electricidad y se expresa en siemens por metro (S/m). Los mapas de ECa ayudan a identificar zonas con alta salinidad, delimitar diferentes tipos de suelo y estimar la variación de sus propiedades con la profundidad (Adamchuk et al., 2018). Para realizar estas mediciones, se utilizan técnicas de contacto galvánico o acoplamiento capacitivo, que consisten en introducir una corriente eléctrica en el suelo y medir la diferencia de potencial resultante. La técnica de acoplamiento capacitivo es particularmente útil en suelos secos o con poca conductividad, ya que permite realizar mediciones sin necesidad de un contacto directo con el suelo (Rossel & Adamchuk, 2013).

- ii) Sensores ópticos y radiométricos que cubren diferentes partes del espectro electromagnético

La evaluación de la conductividad eléctrica y la permitividad eléctrica o constante dieléctrica del suelo depende de la frecuencia de la medición (USDA, 2018). A bajas frecuencias, predomina la conductividad eléctrica, mientras que a frecuencias más altas, la permitividad dieléctrica es más influyente. Técnicas como TDR (Time Domain Reflectometry), FDR (Frequency Domain Reflectometry) y métodos de capacitancia se utilizan a frecuencias superiores a 0.1 GHz para medir cambios en la constante dieléctrica y derivar el contenido de agua en el suelo. Los instrumentos TDR operan a frecuencias de 0,5 a 1 GHz y utilizan pulsos electromagnéticos a lo largo de varillas metálicas (Rossel & Adamchuk, 2013), mientras que las sondas FDR y de capacitancia emplean condensadores para monitorear cambios en la humedad del suelo mediante variaciones en la frecuencia del circuito o el tiempo de carga del capacitor cargarse (Hardie, 2020).



Figura 3.5. Radar de penetración terrestre captura digitalmente propiedades de suelos de múltiples capas con precisión (Veris CoreScan™)

El radar de penetración terrestre o GPR (ground-penetrating radar) utiliza la transmisión y reflexión de ondas electromagnéticas de muy alta y ultra alta frecuencia (30 MHz a 1,2 GHz) para la medición de variaciones en las propiedades del suelo (Figura 3.5.). El sistema funciona mediante el moviendo de las antenas transmisoras y receptoras a través de la superficie del suelo. Debido al gran contraste entre las constantes dieléctricas del agua, el aire y los minerales, el GPR puede utilizarse para medir variaciones en el contenido de agua del suelo. Las mediciones con GPR son no invasivas y pueden medir el contenido de agua en

volúmenes relativamente grandes de suelo. La resolución de las imágenes GPR puede variarse mediante el uso de diferentes frecuencias de antena. Las frecuencias más altas aumentan la resolución a expensas de la profundidad de penetración (USDA, 2018).

La utilización de espectrometría Visible (390-700 nm), Infrarrojo Cercano o NIR (700-2500 nm) e Infrarrojo Medio o MIR (2500-25.000 nm) en el análisis del suelo, es una técnica analítica que se basa en la interacción de la luz con los materiales del suelo. Cuando la luz incide sobre estos materiales, las moléculas absorben energía, lo que provoca vibraciones específicas dependiendo de los componentes presentes en el suelo. La espectroscopia de reflectancia difusa en el rango Vis-NIR-MIR permite medir diversas propiedades del suelo como color del suelo, contenido de materia orgánica, contenido de nitrógeno, contenido de arcilla y arena, óxidos de hierro, pH y contenido de humedad. Esta técnica es conocida por su rapidez, carácter no destructivo y rentabilidad al compararse con el análisis químico tradicional (Adamchuk et al., 2018).

iii) Sensores acústicos

Los sensores acústicos son un método para determinar la textura del suelo. Están compuestos de un vástago con una superficie rugosa y una cavidad hueca equipado con un micrófono que registra el sonido producido a medida que el vástago se mueve a través del suelo. La frecuencia del sonido permite distinguir diferentes tipos de suelo según su estructura (Gorthi et al., 2020).

iv) Sensores que se basan en las interacciones mecánicas sensor-suelo

La resistencia mecánica se puede evaluar mediante dos enfoques básicos. El primero mide la cantidad de energía necesaria para arrastrar un implemento a través del suelo. El segundo mide la resistencia del suelo a la inserción de una sonda (resistencia a la penetración), lo que a su vez permite conocer otras propiedades del suelo, incluyendo la resistencia al corte, la compresibilidad y la fricción entre el suelo y el metal (Rossel & Adamchuk, 2013).

v) Sensores electroquímicos que miden directamente la actividad de iones o moléculas específicas

Los sensores potenciométricos selectivos de iones, como los sensores electroquímicos, utilizan un método de laboratorio modificado para determinar propiedades químicas del suelo, como el pH o el contenido de nutrientes. Estos sensores pueden ser de dos tipos: electrodo selectivo de iones (ISE) o transistor de efecto de campo selectivo de iones (ISFET) (Adamchuk et al., 2018).

Un sistema común de ISE consta de una membrana sensible y un electrodo de referencia. La diferencia de potencial entre la membrana y el electrodo de referencia se evalúa y representa la actividad de iones específicos. Un sistema ISFET integra la selectividad de iones de un ISE y las tecnologías de transistores de efecto de campo. La corriente entre dos electrodos semiconductores (fuente y drenaje) es controlada por un electrodo de compuerta representado por una membrana selectiva de iones. La membrana actúa como un "gate" (puerta) en el transistor, y la concentración de iones cambia el campo eléctrico en el área del canal, afectando el flujo de corriente (Hardie, 2020).

Ambos tipos de sensores detectan la actividad de iones específicos (por ejemplo,  $H^+$ ,  $NO^3^-$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ) pero mientras que los ISE son más comunes en laboratorios y aplicaciones de análisis químico, los ISFET son ideales para dispositivos portátiles o sistemas que requieren monitoreo continuo y rápido, además de ser más robustos y duraderos.

## 2. Sensores de vegetación

Los sensores de vegetación pueden medir una variedad de parámetros, como la clorofila, la temperatura de la hoja, la humedad foliar, la estructura de la hoja, entre otros. Proporcionan información detallada sobre la fisiología y el estado de las plantas. La detección temprana de cualquier cambio en estos parámetros puede ayudar a identificar problemas como deficiencias nutricionales, enfermedades, estrés hídrico o daños por plagas. Los principales dispositivos que se utilizan, clasificados según su principio de funcionamiento se presentan a continuación.

### i) Sensores ópticos

Las características espectrales de la radiación reflejada, transmitida o absorbida por las hojas pueden ser un indicador de estrés y salud en las plantas (ver Figura 3.7.), y además pueden proporcionar una comprensión más profunda de las respuestas fisiológicas a las condiciones de crecimiento y adaptaciones de las plantas al entorno (Padilla et al., 2018).

Los primeros sensores ópticos estudiados para la gestión del nitrógeno (N) en cultivos fueron los relacionados con la medición de clorofila, que estiman indirectamente el contenido de N por unidad de superficie foliar. La clorofila es un compuesto estrechamente relacionado con el contenido de N en las hojas, ya que la mayor parte del N foliar se encuentra en el aparato fotosintético y en las enzimas implicadas en la fotosíntesis (Berni et al., 2009).

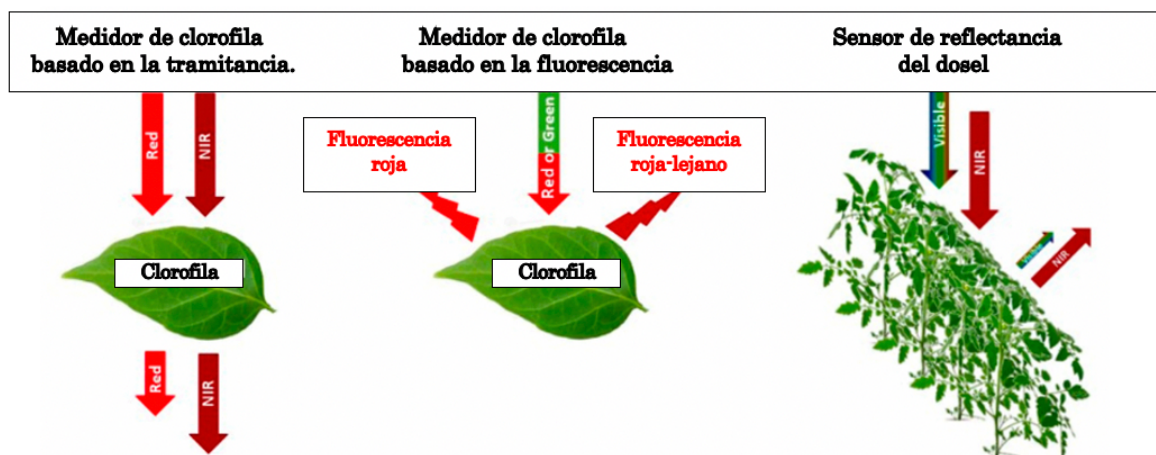


Figura 3.6. Funcionamiento de medidores de clorofila de transmitancia, fluorescencia y reflectancia (adaptado de Padilla et al., 2018)

Los medidores de clorofila difieren en varios aspectos, incluyendo el principio de medición (transmitancia, reflectancia y fluorescencia) (ver Figura 3.6.) las longitudes de onda utilizadas, las unidades de medición y las ecuaciones de calibración para convertir las señales eléctricas en unidades de medición y en índices de interés (Padilla et al., 2018). En la Tabla 3.1. se presentan los tres principales tipos de sensores ópticos proximales sensibles al N utilizados en la gestión de cultivos.

Tabla 3.1. Características de sensores ópticos para la gestión de N en cultivos (adaptado de Padilla et al., 2018)

Tipo de sensor	Dispositivo	Principio de medición	Ancho de banda (nm)	Escala
Medidor de clorofila	SPAD-502	Transmitancia	650, 940	Hoja
	N-tester	Transmitancia	650, 960	Hoja
	atLEAF+	Transmitancia	660, 940	Hoja
	MC-100 Chlorophyll Concentration Meter	Transmitancia	653, 931	Hoja
	CCM-200 Chlorophyll Content Meter Plus	Transmitancia	653, 931	Hoja
	DUALEX	Transmitancia	710, 850	Hoja
	MULTIPLY	Fluorescencia	516, 685, 735	Hoja
Sensor de reflectancia	MSR5/87/16R	Reflectancia	460, 510, 560, 610, 660, 710, 760, 810	Dosel
	CropSpec		730-740, 800-810	Dosel
	Spectral Reflectance Sensor	Reflectancia	532, 570, 650, 810	Dosel
	OptRx Crop Sensor	Reflectancia	670, 728, 775	Dosel
Medidor de flavonoides	N-sensor ALS	Reflectancia	670, 730, 760	Dosel
	Crop Circle ACS 430	Reflectancia	670, 730, 780	Dosel
	Crop Circle ACS 470	Reflectancia	450, 550, 650, 670, 730, 760	Dosel
	RapidScan CS-45	Reflectancia	670, 730, 780	Dosel
	GreenSeeker	Reflectancia	650, 770	Dosel
	GreenSeeker Handheld	Reflectancia	660, 780	Dosel
	DUALEX	Fluorescencia	375, 650	Hoja
MULTIPLY	Fluorescencia	590, 735, 985	Hoja	

El principio de funcionamiento de los sensores de transmitancia y reflectancia se basa en que los pigmentos vegetales, principalmente la clorofila y los carotenoides, absorben fuertemente en la parte visible del espectro (especialmente

a la longitud de onda del rojo), excepto en la región verde. Sin embargo, esta fuerte absorción no ocurre en la parte del espectro correspondiente al NIR, lo que provoca una alta reflectancia en la región NIR de las plantas verdes y saludables (ver Figura 3.7.).

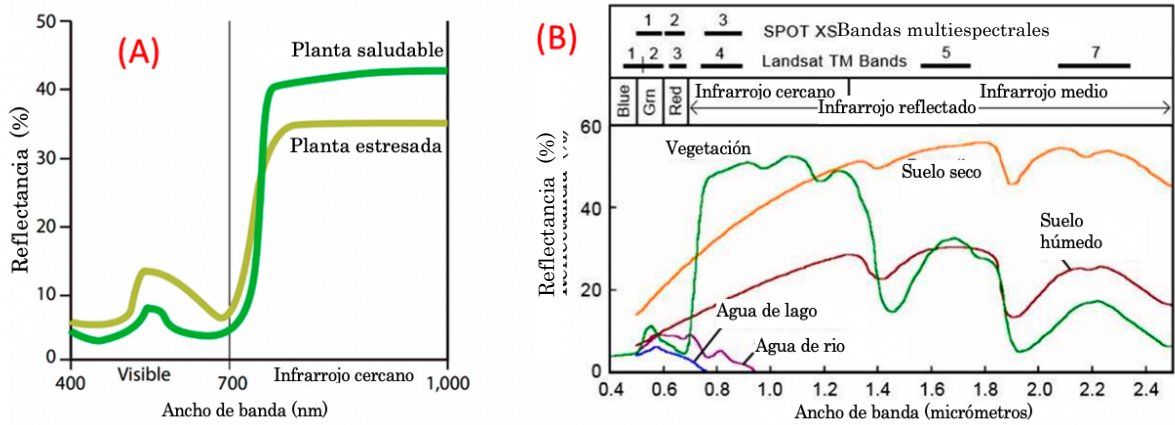


Figura 3.7. Imagen del espectro de reflectancia típico en una planta sana y estresada (A) (adaptado de Verhulst & Govaerts, 2010) y del suelo, agua y vegetación (B) (adaptado de Sishodia et al., 2020)

Los sensores de reflectancia proporcionan información del cultivo para la gestión del nitrógeno mediante el cálculo de la longitud de onda específica de la radiación absorbida y reflejada por el follaje, cuando se posicionan cerca del dosel del cultivo (0.4–3.0 m). El tejido vegetal absorbe aproximadamente el 90% de la radiación VIS y refleja alrededor del 50% de la radiación NIR (750-1300 nm). Los cultivos deficientes en N reflejan más radiación VIS y menos NIR en comparación con los cultivos con suficiente N. La reflectancia diferencial de la radiación VIS-NIR se utiliza para calcular los índices de vegetación (Deery et al., 2014). Los dispositivos más avanzados de sensores de reflectancia, pueden registrar datos de manera continua y se montan en tractores conectados a sistemas GPS para la cartografía del campo (Padilla et al., 2018).

Los sensores de flavonoles basados en fluorescencia se utilizan para monitorear el N en los cultivos estimando el contenido relativo de flavonoles en las hojas. Los flavonoles son compuestos polifenólicos cuyo contenido aumenta con un suministro menor de N y se relaciona inversamente con el contenido de clorofila, conocido como índice de balance de nitrógeno (NBI). Estos sensores emplean el método de fluorescencia de la clorofila, basado en la emisión de fluorescencia en las longitudes de onda correspondientes al rojo y rojo-lejano, por la clorofila mesófila al excitarse con radiación roja y UV. Los flavonoles en la epidermis de la hoja absorben radiación UV y reducen la fluorescencia bajo esta excitación, pero no bajo

la excitación roja. Comparando la fluorescencia bajo ambas excitaciones se estima el contenido de flavonoles (Padilla et al., 2018).

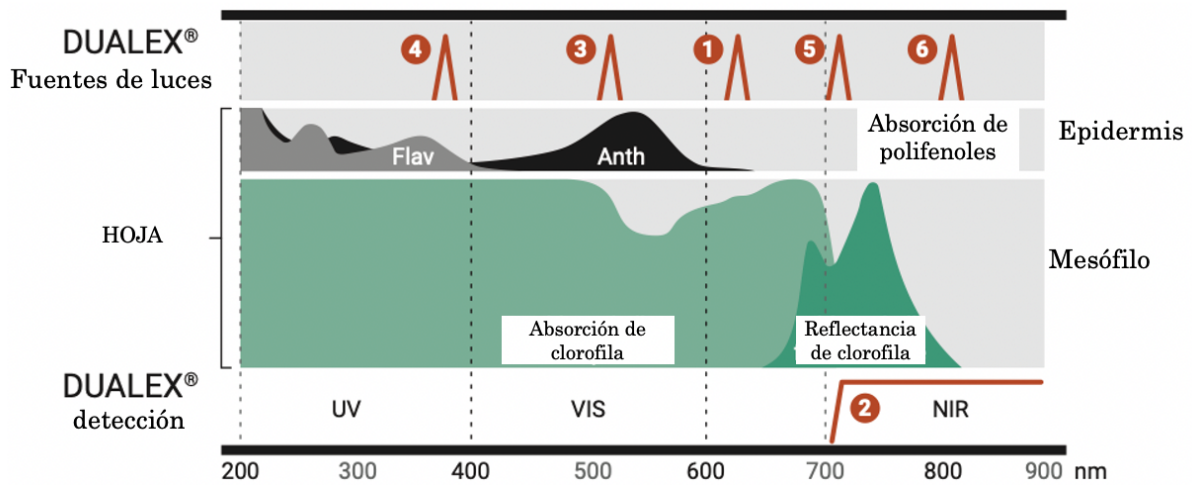


Figura 3.8. Principio de funcionamiento del sensor de pinza foliar. Los puntos 1,3,4,5 y 6 indican las longitudes de onda empleadas para la excitación y el punto 2 las de emisión (ForceA, 2024)

Los tipos de sensores más utilizados son de pinza foliar y el sensor manual proximal que mide a 10 cm de la hoja. En la Figura 3.8. se presenta el principio de funcionamiento de la pinza foliar para medir contenido de flavonoles y antocianinas en la epidermis de las hojas gracias a una relación diferencial de fluorescencia con la clorofila (ForceA, 2024).

## ii) Sensores termográficos

Las cámaras termográficas proporcionan imágenes térmicas que permiten visualizar cómo irradia calor un objeto, registrando la temperatura de cada pixel de la imagen en un tono de color. Normalmente las imágenes térmicas muestran las temperaturas más frías en un tono de azul, violeta o verde, mientras que las temperaturas más cálidas se les puede asignar un tono de rojo, naranja o amarillo.

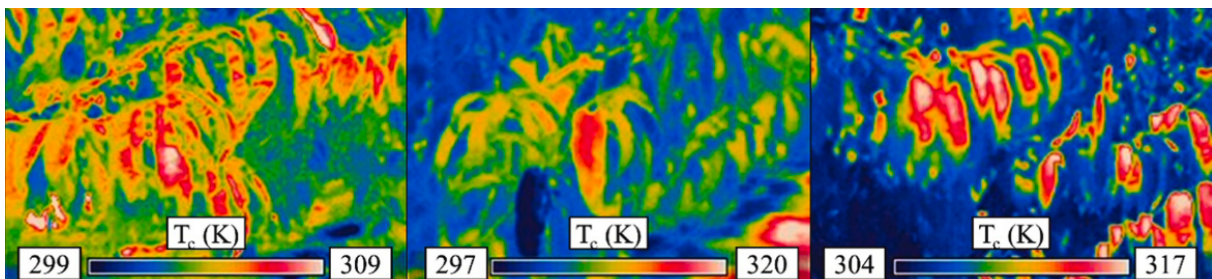


Figura 3.9. Imágenes térmicas (K) de cámara portátil en melocotoneros bajo distintos programas de condiciones de riego (Ramírez-Cuesta et al., 2022)

Existen cámaras que se usan para obtener imágenes a nivel del suelo para registrar la temperatura de la vegetación y correlacionarla con una situación de déficit hídrico como se puede observar en la Figura 3.9. (Ramírez-Cuesta et al.,

2022). Así se puede evaluar y transmitir en tiempo real la disponibilidad hídrica de las plantas mediante el cálculo del índice de stress hídrico de cultivo (CWSI, Crop Water Stress Index). En el  $CWSI_g$ , el subíndice  $g$  hace referencia a que se basa en mediciones obtenidas directamente del terreno, utilizando sensores terrestres para medir la temperatura de las hojas o del dosel. El método  $CWSI_g$  considera las temperaturas referenciales de una hoja seca y otra húmeda, según la Ecuación 3.1. (Jones et al., 2002):

$$CWSI_g = \frac{T_{c, g} - T_w}{T_d - T_w}$$

Ecuación 3.1. Índice de estrés hídrico de cultivo (Jones et al., (2002)

Donde,  $T_{c,g}$  es la temperatura del cultivo tomada a nivel del suelo,  $T_w$  (*Temp. wet*) es la temperatura de referencia húmeda que corresponde a una hoja con estomas completamente abiertos. Mientras que la temperatura de referencia seca  $T_d$  (*Temp. dry*) considera una hoja que no transpira y tiene los estomas completamente cerrados. En condiciones de estrés hídrico, los estomas se cierran, reduciendo la transpiración y aumentando la temperatura de las hojas. En ausencia de estrés hídrico, la temperatura de la hoja puede ser de 1 a 4 °C menor que la temperatura ambiente, lo que refleja un  $CWSI_g$  de 0. Cuando el déficit hídrico es alto y la transpiración disminuye significativamente, la temperatura foliar puede aumentar de 4 a 6 °C respecto al aire, indicando un  $CWSI_g$  cercano a 1. Lo que representa condiciones severas de estrés hídrico o inactividad de la planta por falta de transpiración prolongada. La información respecto al  $CWSI_g$  es utilizada para generar mapas de rendimiento, gestionar el riego o aplicar soluciones relacionadas con la gestión del agua (Ramírez-Cuesta et al., 2022).

### iii) Sensores mecánicos

Los sistemas de sensores mecánicos deben estar en contacto directo con la planta para medir sus cambios mecánicos. Los dendrómetros se utilizan para medir el cambio de diámetro de los árboles. Estos cambios pueden darse a largo plazo debido al crecimiento del árbol y a corto plazo, durante el día y pueden indicar el contenido de agua del tallo (ver Figura 3.10a.) (Adamchuk et al., 2018). También existen sensores mecánicos que realizan mediciones en tiempo real de los cambios de presión en la turgencia de las hojas. Este sistema se fija a la hoja mediante dos sellos dotados de imanes. Un sello contiene un transductor de presión y puede permanecer en la hoja durante varios meses (ver Figura 3.10b.) (Seedmech, 2024).

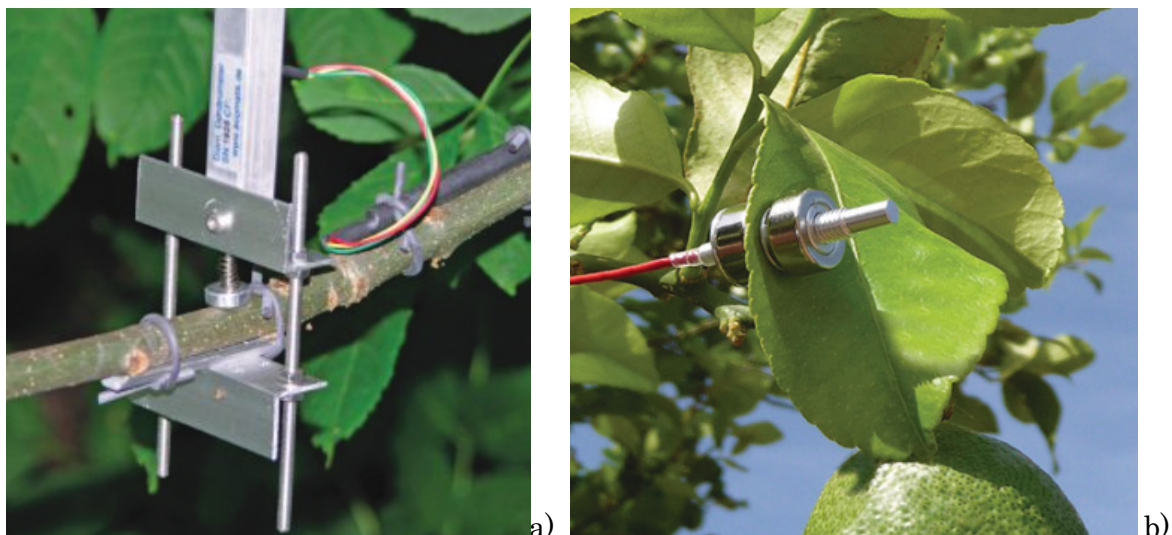


Figura 3.10. Imagen de dendrómetro (a) y sensor de hoja (b) (Seedmech, 2024)

### 3. Estaciones meteorológicas

Un sensor meteorológico, es un dispositivo que capta información sobre una magnitud meteorológica y la transforma en datos cuantificables y procesables. Al agruparse en estaciones meteorológicas (ver Figura 3.11.a) estos sensores pueden integrarse en redes de observación de distintas escalas y finalidades (AEMET, 2024). Estas estaciones permiten la monitorización continua de variables como: temperatura, presión atmosférica, viento (dirección y velocidad), radiación solar, humedad y precipitación.

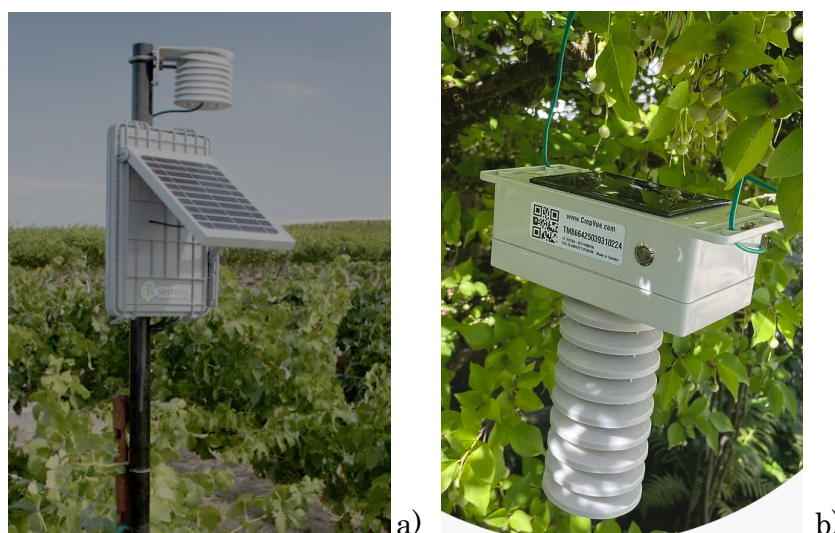


Figura 3.11. Estación meteorológica (semios, 2024) (a) y sensor meteorológico en el dosel (b) (CropVue, 2024)

El sensor meteorológico en el dosel permite la detección precisa de datos meteorológicos locales, el monitoreo de heladas y el soporte de hardware de terceros, como sensores para medir la humedad foliar (p.e. sensor PHYTOS 31 que

simula una hoja real). Estos dispositivos pueden estar además dotados de un panel solar de alimentación, GPS para auto-localización en mapas y conectividad a la red para transmisión de datos en la nube. Colocados directamente en el cultivo (ver Figura 3.11.b), estos sensores aseguran la máxima precisión en la obtención de datos para el cálculo variables que se utilizan en modelos de predicción de la eclosión de huevos de plagas, enfermedades foliares e infecciones fúngicas y la maduración de los cultivos (CropVue, 2024).

#### 4. Otros dispositivos

##### i. Trampas electrónicas

Existen nuevos sistemas de medición de las condiciones de campo que han otorgado nuevas oportunidades a los sistemas de producción, en particular cuando se implementa el Manejo Integrado de Plagas (Miranda et al., 2019).

El monitoreo y control de plagas agrícolas ha dado un salto tecnológico con el desarrollo de trampas automáticas, electrónicas o inteligentes. Estos dispositivos se definen como trampas equipadas con sensores para el registro de datos (e imágenes) en campo, con componentes de hardware y software para su transmisión a un servidor remoto con acceso en línea, donde se almacena y/o procesa la información con referencias geográficas (ver Figura 3.12.) (Jiang et al., 2008).

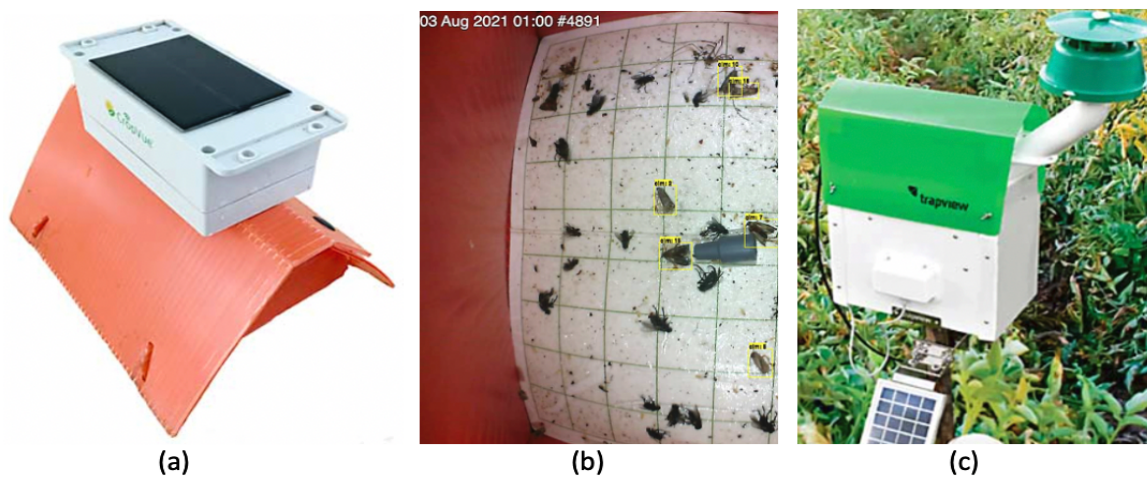


Figura 3.12. La cámaras trampa de CropVue con un panel solar para cargar la batería (a). Imagen del papel adhesivo y atrayente de una trampa electrónica (b) (CropVue, 2024). Cámara trampa de Trapview con papel autoadhesivo de repuesto, un panel solar y un nodo meteorológico (c) (Trapview, 2024)

Las trampas con cámara automatizada e iluminación pueden registrar y monitorear la presión de las plagas a diario mediante cebos de feromonas. Además incorporan un panel solar integrado, GPS para ubicación automática en un mapa y conectividad a la nube (CropVue, 2024). También pueden incluir sensores de

temperatura, humedad, viento y/o lluvia transmitiendo todos estos datos a un servidor. Los servicios en la nube procesan el conjunto de datos empleando modelos de predicción, informando sobre tendencias de evolución de las plagas y activando, según los umbrales establecidos, alarmas que pueden ser notificadas al usuario directamente, tanto al teléfono móvil como al navegador web a través de una aplicación específica (Curkovic et al., 2023).

ii. Cámara de presión Scholander

La cámara Scholander PMS es un dispositivo equipado con una bomba de aire integrada, diseñada para generar la presión necesaria para realizar mediciones directas del potencial hídrico de la planta, lo que permite evaluar su estado hídrico. Esta medición determina la tensión con la que el agua está retenida en los tejidos vegetales, expresándose en valores negativos. El valor de 0 bares corresponde al máximo nivel de hidratación, mientras que valores más negativos indican una menor hidratación. La medición refleja la tensión del agua en el xilema, específicamente en una hoja del árbol en este caso (MMM Tech Support, 2024).

### **3.1.5 Tecnologías de información y comunicación**

#### **3.1.5.1 Conectividad**

Las tecnologías de conexión son herramientas y sistemas que permiten la interconexión y comunicación entre dispositivos y redes, facilitando el intercambio de datos y la colaboración en tiempo real. Las herramientas de Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) son fundamentales para el funcionamiento de la infraestructura digital moderna y se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, desde el sector agrícola hasta la industria, el comercio y el consumidor final (Bacco et al., 2020).

Las TICs abarcan muchos tipos diferentes de tecnologías, desde computadoras e internet hasta comunicaciones por radio y el IoT, y su impacto está desempeñando un papel crucial en la promoción de la innovación en el sector agrícola. Estas innovaciones (incluyendo aspectos de software y hardware, manejo de datos, comunicación de datos, e interpretación de datos) están revolucionando la agricultura (Avola et al., 2024).

Se utilizan varias tecnologías de comunicación para la transmisión de datos de sensores de proximidad a un nodo, servidor o almacén de bases de datos. Algunas de las tecnologías más empleadas incluyen:

- **Redes de Sensores Inalámbricos (WSN - Wireless Sensor Networks):** Son redes que conectan varios sensores en el campo para monitorear diferentes parámetros como la humedad del suelo, temperatura y otros factores. Estas redes permiten la recopilación y transmisión de datos en tiempo real, utilizando protocolos como Zigbee, LoRa, y NB-IoT. La integración de WSN con tecnologías de IoT también se utiliza para mejorar la recopilación de datos y su procesamiento eficiente (Maita & Maiolo, 2021; Salas et al., 2014). La revisión sobre patentes de Avola et al. (2024) pone de manifiesto que las principales innovaciones en el área de las TICs se han dirigido a desarrollar sensores inalámbricos como unidades autónomas o conectadas en WSNs.
- **Zigbee:** Es un protocolo de comunicación de corto alcance utilizado en redes de sensores inalámbricos para la transmisión de datos entre sensores y nodos. Es ideal para entornos agrícolas donde se requiere bajo consumo de energía y una red de nodos distribuidos en grandes áreas (Salas et al., 2014).
- **LoRa y LoRaWAN:** Estas tecnologías permiten la transmisión de datos a larga distancia con bajo consumo de energía, lo que las hace ideales para la monitorización de grandes campos agrícolas. LoRaWAN proporciona conectividad de largo alcance y es ampliamente utilizada para integrar sensores en el entorno agrícola (Spisic et al., 2022).
- **NB-IoT (Narrowband IoT):** Esta tecnología se utiliza para conectar sensores en áreas rurales a través de una red de bajo ancho de banda, facilitando la transmisión de datos en tiempo real sobre grandes áreas geográficas. Es ideal para entornos con una infraestructura limitada y donde la duración de la batería es crucial (Maita & Maiolo, 2021).
- **GPRS (General Packet Radio Service):** Se utiliza como tecnología de red complementaria para integrar las redes de sensores inalámbricos con Internet. Es particularmente útil en aplicaciones donde se requiere el acceso global a los datos recopilados por sensores distribuidos en un área amplia (Salas et al., 2014).
- **Tecnología satelital:** El uso de satélites para la transmisión de datos asegura la conectividad continua incluso en áreas remotas, permitiendo que la información recogida en el campo sea enviada a servidores o centros de control en tiempo real. Esto es particularmente importante en sistemas automatizados de riego o gestión de maquinaria (Lyle, 2013).

### 3.1.5.2 Computación

Con la llegada de la computación en la nube, la IA y las tecnologías de Big Data, las prácticas agrícolas tradicionales se han transformado significativamente, logrando una mejor producción y calidad de los productos. Esto ha generado un creciente interés en la aplicación de estas tecnologías para la monitorización del sector agrícola (Wei et al., 2023).

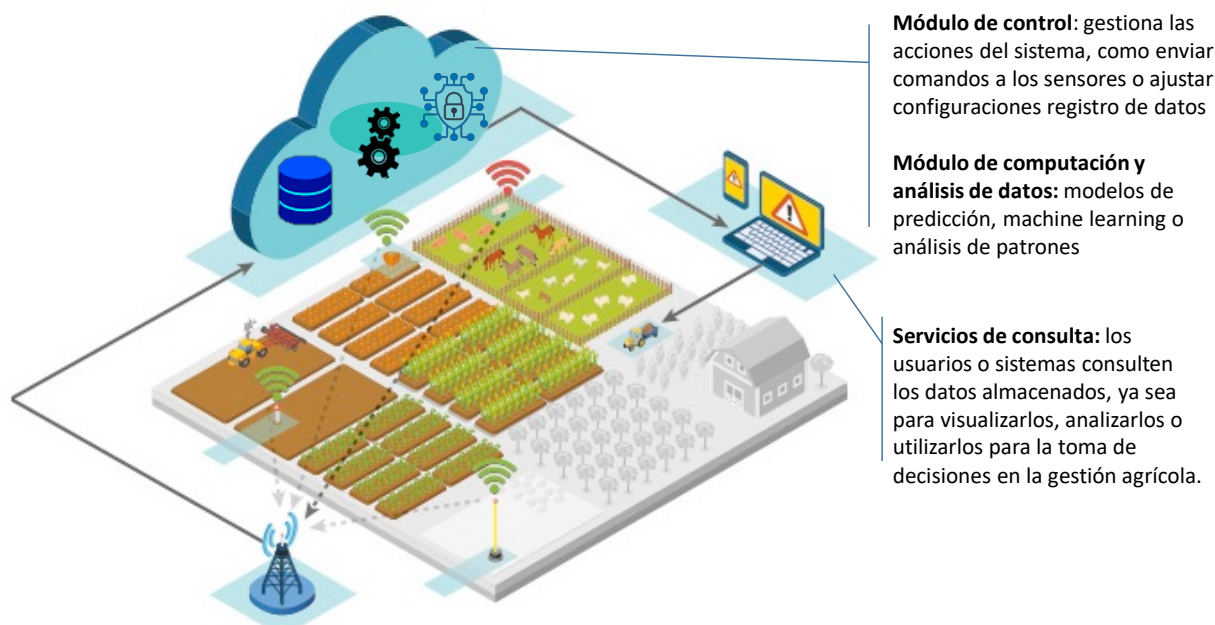


Figura 3.13. Monitoreo de redes de sensores inalámbricos (WSN) basada en computación en la nube modificado de (Wei et al., 2023)

El Big Data en la agricultura se refiere al uso de grandes volúmenes de datos recopilados de diversas fuentes, procesados y analizados para tomar decisiones más informadas en la gestión agrícola. En este con, el término Big Data implica no solo la cantidad de datos, sino también la complejidad, la velocidad a la que se generan, y la variedad de las fuentes de datos. El funcionamiento de Big Data se basa en las siguientes etapas (ver Figura 3.13.) (Wei et al., 2023 : Misra et al., 2022):

i. Recogida de datos

El primer paso en el uso de Big Data es la recopilación de grandes cantidades de datos provenientes de varias fuentes dentro del entorno agrícola. Estas fuentes pueden incluir:

- Sensores de campo: Sensores que miden la humedad del suelo, temperatura, niveles de nutrientes, pH, y otros factores relacionados con el suelo y los cultivos.

- Maquinaria agrícola: Tractores, cosechadoras y otras máquinas equipadas con sensores que recopilan datos sobre las operaciones de campo, como la siembra, la cosecha y la aplicación de insumos.
- Imágenes de drones o satelitales: Capturan imágenes aéreas de alta resolución de los cultivos, proporcionando información sobre el crecimiento de los cultivos, la salud de las plantas y el estrés hídrico.
- Estaciones meteorológicas: Proporcionan datos climáticos en tiempo real, como la temperatura, la humedad y las precipitaciones, esenciales para la planificación agrícola.
- Historial de cultivos: Datos sobre los rendimientos anteriores, el uso de insumos, plagas y enfermedades, y patrones de riego.

ii. Almacenamiento y gestión de datos

Después de la recogida de datos, éstos deben ser almacenados en sistemas capaces de manejar grandes volúmenes de información. Generalmente, esto implica el uso de tecnologías de almacenamiento en la nube y sistemas de bases de datos escalables que permiten acceder a la información en tiempo real desde cualquier ubicación.

iii. Procesamiento de datos

Los datos recopilados suelen ser heterogéneos (es decir, vienen de diversas fuentes y tienen formatos diferentes), por lo que deben ser procesados y organizados para su análisis. Este procesamiento implica:

- Limpieza de datos: Eliminación de duplicados, errores y datos irrelevantes para mejorar la calidad del conjunto de datos.
- Estandarización: Transformar los datos en formatos consistentes y compatibles para que puedan ser analizados de manera eficiente.
- Integración: Combinar diferentes fuentes de datos, como información de sensores y datos climáticos, para obtener una imagen más completa de las condiciones agrícolas.

iv. Análisis de datos

Una vez procesados, los datos se analizan utilizando herramientas avanzadas de análisis, como algoritmos de machine learning (aprendizaje automático), IA y modelos predictivos. Estas herramientas permiten:

- Identificación de patrones: Los modelos analizan grandes cantidades de datos históricos y actuales para identificar patrones y correlaciones, como la relación entre la cantidad de agua y el rendimiento de los cultivos.
- Predicción de eventos futuros: Los algoritmos predictivos pueden estimar futuros rendimientos, necesidades de insumos, o la probabilidad de plagas o enfermedades basados en los datos históricos y actuales.
- Toma de decisiones optimizada: Con los resultados del análisis, los agricultores pueden tomar decisiones más informadas, como cuándo aplicar fertilizantes o la cantidad exacta de agua necesaria para un riego eficiente.

v. Automatización y retroalimentación

El Big Data también se integra con sistemas de automatización en la AP. Esto significa que, basándose en el análisis de datos, las acciones pueden automatizarse, como la programación del riego o la distribución de fertilizantes de manera precisa. Además, el sistema puede aprender de los resultados pasados, ajustando continuamente las recomendaciones y optimizando las operaciones agrícolas.

vi. Visualización y toma de decisiones

Finalmente, el resultado del análisis de Big Data se presenta a los agricultores mediante herramientas de visualización de datos. Estas plataformas proporcionan gráficos, mapas y reportes que permiten a los agricultores comprender fácilmente la situación actual y tomar decisiones basadas en datos concretos.

### 3.1.6 Tecnologías de posicionamiento y navegación

Inicialmente enfocadas en el uso de sensores de ubicación, las prácticas más avanzadas de AP continúan requiriendo y aplicando tecnologías de posicionamiento. Las principales tecnologías de posicionamiento y guiado actualmente empleadas en la AP incluyen una variedad de sistemas basados en satélites y tecnologías de sensores avanzados. Aquí están las más relevantes:

#### 3.1.6.1 Sistemas de Navegación Global por Satélite (GNSS)

Las tecnologías de posicionamiento global basadas en los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS), como el GPS NAVSTAR de EE.UU., el GLONASS de Rusia, el Galileo europeo, el BeiDou de China, el Sistema de Satélites Quasi-Zenith de Japón y el NAVIC de India, y las herramientas que

permiten a los usuarios capturar, almacenar, manipular y analizar información espacial (los Sistemas de Información Geográfica - GIS), son unos de los elementos más comunes en la AP. Los sistemas GNSS son fundamentales para proporcionar una alta precisión en el posicionamiento de maquinaria agrícola. Como resultado, las últimas patentes en este campo están relacionadas con proporcionar datos de alta precisión basados en GNSS que pueden integrarse fácilmente con la información verificada en el terreno, como los límites de los campos, optimización de operaciones de maquinaria, cobertura de cultivos, salud de los cultivos, infestación de malezas, monitoreo de rendimiento y mapeo de tierras (Avola et al., 2024).

Los sistemas de navegación satelital global constan de tres segmentos: el espacial (satélites en órbita), el de control (gestión y monitoreo de los satélites) y el de usuario (receptores y aplicaciones que utilizan las señales para determinar posiciones). Los satélites emiten señales de radio con información sobre su ubicación en un sistema de referencia geocéntrico. Un receptor en la Tierra decodifica estas señales para calcular la distancia a cada satélite. Utilizando la trilateración 3D, se determina la posición del receptor. Con un satélite, se obtiene un círculo de posibles ubicaciones; con dos, se reduce a dos puntos; y con tres, se obtiene una ubicación precisa. Un cuarto satélite es necesario para corregir el desfase temporal entre el sistema GNSS y el receptor, permitiendo una posición tridimensional exacta (Jeffrey et al., 2010).

La exactitud en los receptores GNSS se refiere a la capacidad de proporcionar lecturas cercanas a los valores reales, y la precisión es la capacidad de ofrecer lecturas consistentes bajo condiciones estables. Para lograr alta exactitud y buena precisión en los receptores GNSS, a menudo se necesitan sistemas de corrección o aumentación (Jeffrey et al., 2010). Los sistemas de aumentación se dividen en dos categorías principales: los basados en satélites (SBAS) y los ubicados en tierra (GBAS). Ambos tipos utilizan una antena fija en una posición conocida para medir errores en las estimaciones de posición. La antena fija recibe señales de los satélites y calcula el error comparando la ubicación estimada con la ubicación real, generando un mensaje de corrección que se envía al receptor móvil (rover), logrando una exactitud absoluta de menos de 1 metro y una exactitud relativa de menos de 50 cm. Por otro lado, los GBAS envían los mensajes de corrección mediante redes terrestres como radio, internet o Wi-Fi, y pueden alcanzar una exactitud de menos de 5 cm con estaciones virtuales que proporcionan correcciones personalizadas (Redagrícola, 2017).

Por otro lado, los receptores RTK (Real-Time Kinematic), mejoran la precisión del GNSS hasta niveles centimétricos. El sistema RTK utiliza una estación base fija que está instalada en una ubicación conocida con coordenadas precisas. La estación base recibe señales de satélites GNSS y calcula su posición continuamente. Dado que la posición de la estación base es conocida con exactitud, puede determinar con precisión los errores presentes en las señales de los satélites, como los errores debidos a la ionosfera o los relojes de los satélites. La estación base compara la posición calculada por las señales satelitales con su posición conocida y calcula el error diferencial en las señales GNSS. Esta corrección diferencial es la clave del funcionamiento de RTK, ya que ajusta las pequeñas imprecisiones que se producen debido a la atmósfera y otros factores. Las correcciones calculadas por la estación base se transmiten al rover, generalmente instalado en vehículos agrícolas y drones en tiempo real, lo que permite que el receptor rover corrija su posición de manera instantánea con una precisión centimétrica. Esto es crucial en aplicaciones donde una alta precisión es necesaria, como la siembra en filas exactas en AP, evitando la superposición de pasadas de maquinaria y optimizando el uso (Pini et al., 2020).

### **3.1.6.2 Asistencia al guiado, sistemas de guiado automático y autopilotaje**

La asistencia al guiado y el guiado automático del tractor son las tecnologías de navegación de maquinaria agrícola más desarrolladas, y han estado en uso comercial durante aproximadamente dos décadas. Estos sistemas permiten posicionar los tractores con precisión en el campo o en relación con el cultivo, con una interacción mínima del conductor. Esto reduce la fatiga del operador liberándolo para monitorear mejor las operaciones de los implementos y las máquinas. Además, con la precisión de posicionamiento adecuada es posible implementar técnicas de agronomía avanzada como es el caso de siembra de precisión entre hileras, y las prácticas de tráfico controlado de tractores y equipos en el campo (Baillie et al., 2018). Uno de los principales beneficios de la tecnología de guiado es la reducción de la superposición durante la pulverización y la fertilización, lo que optimiza tanto los costos de los insumos como la eficiencia de la maquinaria (Antille et al., 2018).

Los paquetes de automatización de guiado y dirección varían en cuanto a la precisión del posicionamiento, dependiendo de la tecnología subyacente como es el caso del paquete GNSS con sensores de cultivo. También difieren en el nivel de retroalimentación y control, que puede ir desde una simple guía mediante barra de

luces para el operador con dirección manual, hasta accesorios en el volante o un control de dirección completamente integrado en el mecanismo de dirección del tractor (Han et al., 2004). Todos los principales fabricantes de tractores ofrecen algún tipo de sistema de guía y control de dirección automatizado, y también existen empresas especializadas que ofrecen estos sistemas (Baillie et al., 2018).

### 3.1.6.3 Sistemas de información geográfica (GIS)

Un GIS es un sistema que permite capturar, almacenar, analizar, gestionar y visualizar datos geoespaciales (datos relacionados con la ubicación). Los GIS combinan información geográfica (como mapas, coordenadas, imágenes satelitales) con datos descriptivos, lo que permite analizar patrones, relaciones y tendencias en diversas disciplinas, incluida la AP, según las siguientes etapas (Oshunsanya et al., 2017; Sharma & Srushtideep, 2022).

#### i. Recogida de datos geoespaciales

Se recopilan datos relacionados con las características del campo, como límites, tipos de suelo, humedad, variabilidad de nutrientes, plagas, enfermedades, producción superficial entre otros. Estos datos provienen de diversas fuentes, como sensores de suelo, drones, imágenes satelitales, sensores en las máquinas y GPS

#### ii. Creación de mapas geoespaciales

El GIS procesa los datos y genera mapas digitales que muestran información relevante, como la variabilidad de la producción superficial del cultivo en diferentes partes del campo o la distribución de nutrientes en el suelo. Estos mapas permiten identificar áreas específicas que requieren un manejo diferenciado, como zonas con deficiencias de nutrientes o áreas afectadas por plagas.

#### iii. Análisis de datos

El software GIS permite realizar análisis avanzados sobre los datos espaciales. Los agricultores pueden comparar múltiples capas de información (suelo, clima, rendimiento) para identificar patrones y tomar decisiones más informadas sobre la siembra, fertilización, riego y otras prácticas agrícolas.

#### iv. Generación de mapas de prescripción

Una de las aplicaciones más importantes de GIS en la AP es la creación de mapas de prescripción. Estos mapas son utilizados por la maquinaria agrícola equipada con sistemas de aplicación variable de insumos (fertilizantes, pesticidas,

agua) de manera diferenciada según las necesidades específicas de cada área del campo. De esta manera, se optimiza el uso de insumos y se maximiza la productividad.

v. Monitoreo y gestión continua

A lo largo de la temporada de cultivo, el GIS permite un monitoreo continuo de las condiciones del campo. Los agricultores pueden actualizar los datos en tiempo real y ajustar sus decisiones en función de la información más reciente. Por ejemplo, un cambio repentino en las condiciones climáticas o un brote de plagas en una parte del campo puede ser rápidamente identificado y gestionado mediante las herramientas GIS.

### 3.1.7 Tecnologías de reacción

Como ya se ha indicado, las tecnologías de medición proporcionan datos procesables. Al tener esta información en tiempo real o en mapas de prescripción, se pueden utilizar dispositivos de actuación automatizados para controlar el riego, la fertilización y realizar el control de plagas. La tecnología de dosis variable permite que las dosis de aplicación de insumos se ajusten en diferentes partes del campo, para una gestión específica de la variabilidad del terreno (Avola et al., 2024).

Existen dos tipos de tecnologías de aplicación de dosis variable: basado en mapas prescripción y basado en sensores. Un mapa de prescripción en AP es una herramienta clave para la aplicación de insumos a dosis variable. Su uso se basa en la implementación de un sistema GIS mediante la recopilación de datos geoespaciales y agronómicos (como nutrientes del suelo, rendimiento de cultivos, y datos climáticos).

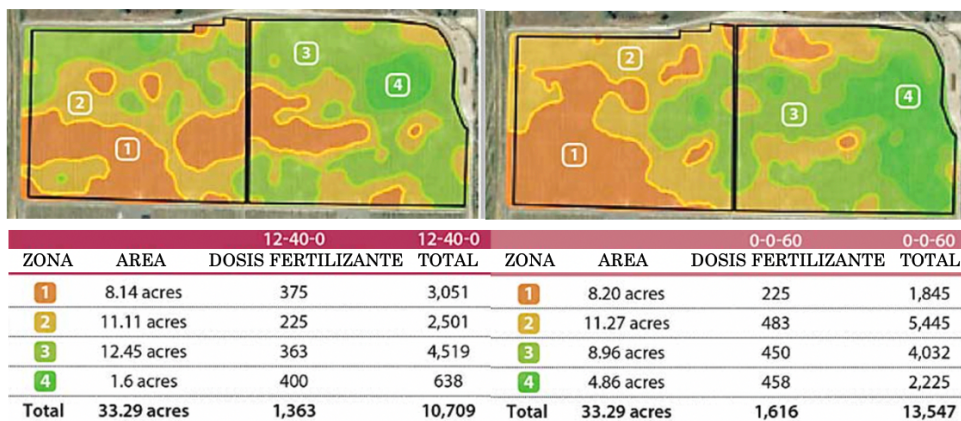


Figura 3.14. Mapas de variabilidad en fertilidad de fósforo (izq.) y potasio (der.) en suelos, y programa de fertilización en libras según zonas en frutales (Kate Pregelmann, 2024)

En la Figura 3.14. se muestran dos mapas que presentan la variabilidad de los suelos en un cultivo de manzanas en cuanto a la disponibilidad de fósforo y potasio, elaborados a partir de los datos de sensores móviles y análisis de suelo. Una vez generado el mapa de prescripción se puede cargar en la maquinaria agrícola equipada con tecnología de dosis variable para generar instrucciones específicas sobre cómo aplicar insumos (fertilizantes, agua, fitosanitarios) en diferentes partes de un campo de manera precisa.

Los datos se utilizan para establecer un programa de aplicación de dosis variable con el fin de mejorar el rendimiento de las áreas débiles de los sectores del cultivo (Kate Prengaman, 2024). Un sistema de posicionamiento GPS identifica la ubicación, mientras un sistema de control de dosis variable ajusta la maquinaria para aplicar la cantidad exacta de insumos según la posición y las directrices del mapa de prescripción (ver Figura 3.15.) (Ess et al., 2001).

La tecnología basada en sensores, no requiere mapas ni sistemas de posicionamiento preexistentes. En su lugar, utiliza sensores que miden en tiempo real las propiedades deseadas del suelo y del cultivo mientras se realiza la aplicación (Figura 3.16.a). Dado que estos sensores operan en áreas muy pequeñas, el sistema necesita procesar la información de manera instantánea sobre, por ejemplo, el volumen y sanidad del dosel y ajustar rápidamente la dosis del insumo correspondiente (Figura 3.16.b). De igual forma se pueden generar mapas detallados a partir de los datos recolectados y georreferenciados durante la aplicación (Wei et al., 2023).

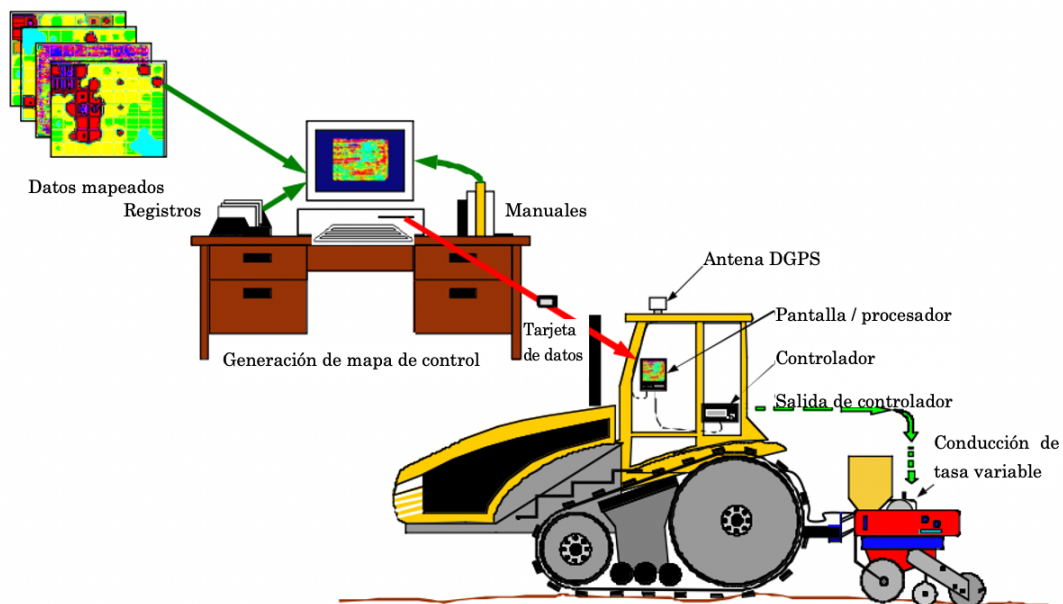


Figura 3.15. Sistema basado en mapas de prescripción para variar la dosis de aplicación de insumos agrícolas (adaptado de Ess et al., 2001)

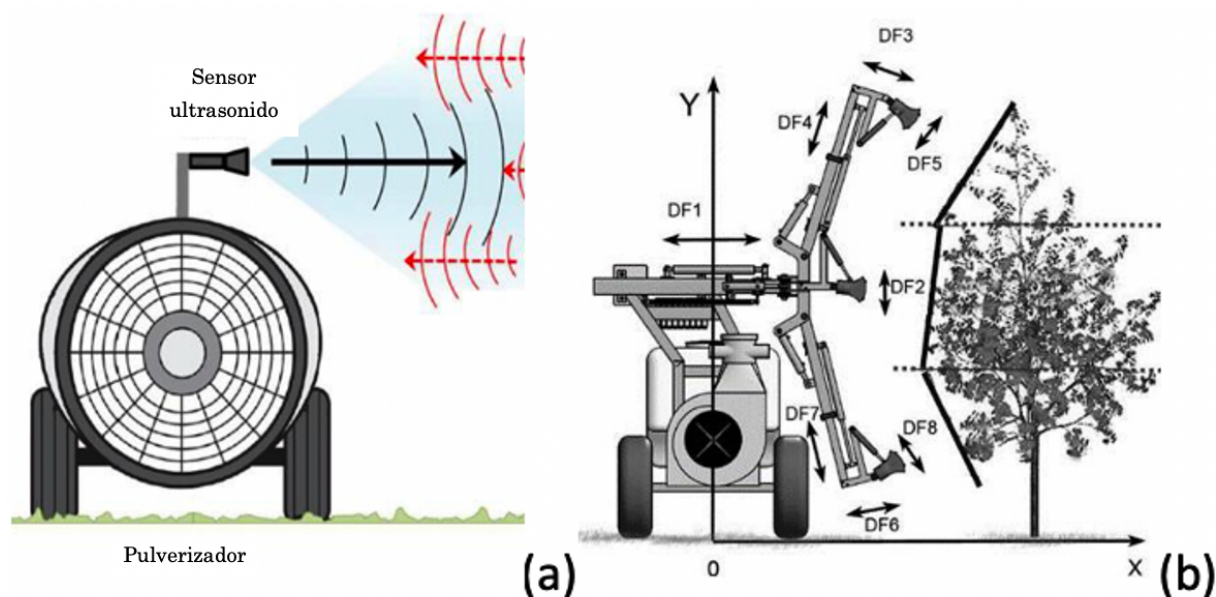


Figura 3.16. Diagrama esquemático de medición de la densidad del dosel con el sensor ultrasónico (a) (adaptado de Palleja & Landers, 2015) y pulverizador de aplicación de dosis variables (b) (adaptado de Osterman et al., 2013)

### 3.1.8 Implementación de tecnologías de agricultura de precisión en la producción de fruta

Los cultivos de frutales suelen presentar una elevada variabilidad espacial dentro de las parcelas, debido a factores como la edad de los árboles, la variabilidad del suelo y las diferencias en las necesidades hídricas y nutricionales de cada planta. Esto hace que las tecnologías de AP, como la aplicación de dosis variable en una parcela y el monitoreo de la salud del cultivo, sean esenciales para optimizar los insumos y mejorar la producción.

En relación a la fertilización, el estudio de Colaço et al. 2017, realizado en cítricos compara el tratamiento de fertilización de aplicación variable (AV) con el tratamiento de aplicación uniforme (AU) propio de la agricultura convencional. En el tratamiento AV, las aplicaciones se realizaron según mapas de prescripción basados en la fertilidad del suelo (para la aplicación de K) y en las condiciones nutricionales en hoja (para la aplicación de N), junto con mapas de rendimiento. Para generar estos mapas se recogieron muestras de suelo y foliares en 50 puntos de cada campo (aproximadamente 2 puntos por  $\text{ha}^{-1}$ ) y el número de puntos de control de producción superficial en cada cosecha osciló entre 800 y 2000. En el tratamiento AU, las prescripciones y aplicaciones fueron realizadas siguiendo métodos convencionales basados en una única muestra de suelo, un análisis foliar, y en la producción superficial media de cada campo. La AV en comparación con la

AU supuso una reducción significativa de los insumos de un 37,4% en  $K_2O$  y un 39,6% en N, en promedio una reducción del 39% en relación con la cantidad total aplicada en 5 años. Registrándose un aumento en la eficiencia  $kg_{naranja}/kg_{input}$ , al incrementar el rendimiento de cosecha en un 13.1% en AV.

El estudio de Wang et al., 2024 realizado en el cultivo de manzanos, formuló un programa de fertilización de aplicación variable de N, P, y K, basado en la variabilidad de los nutrientes disponibles en el suelo, fundamentado en el muestreo en cuadrícula de la fertilidad del suelo del cultivo. Según los resultados, la fertilización de dosis variable redujo la aplicación de nitrógeno, fósforo y potasio en un 42%, 46% y 19%, respectivamente (con un promedio de 36%), y aumentó el rendimiento de cosecha de manzanas en un 27% en comparación con la fertilización tradicional.

Según Aggelopoulou et al., 2010 en manzanos y Vatsanidou et al., 2017 en perales, generaron a partir del mapa de rendimiento del año anterior, una estimación de la cantidad de N extraído del suelo según los valores establecidos por la International Fertilizer Industry Association (Halliday & Trenkel, 1992), obteniendo un mapa de prescripción de aplicación variable de N. El mapa de producción superficial se obtuvo promediando la producción de fruta cada cinco árboles, la posición geográfica del árbol central del grupo se registró con un GPS generando una malla de 80. Aplicando el N de forma específica en cada lugar, se pudo ahorrar hasta un 56% en peral y 38% en manzanos, en comparación con AU, que estableció una dosis de fertilización nitrogenada uniforme para toda la finca en función de la producción superficial media obtenida el año anterior.

Según Liakos et al., 2020, utilizaron la metodología de mapa de producción para generar el mapa de aplicación variable de N en manzano. El mapa de producción se obtuvo delimitando las hileras en secciones de 20 m (ver Figura 3.17.), donde obtuvieron el peso de la fruta recolectada en cada sección con localización del centro de cada sección por GPS. La dosis de fertilización se redujo un 61% en promedio de dos temporadas con respecto a la AU.

Según Zaman et al. 2005, analizó en naranjos la AV de fertilizantes nitrogenados siguiendo mapas de prescripción generados a partir del tamaño del dosel de los árboles escaneado por ultrasonido. La AV de fertilizante redujo la dosis a los árboles más pequeños significando un ahorro en promedio de un 39% de fertilizante en comparación con la aplicación uniforme del productor de  $270 \text{ kg de N ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ .

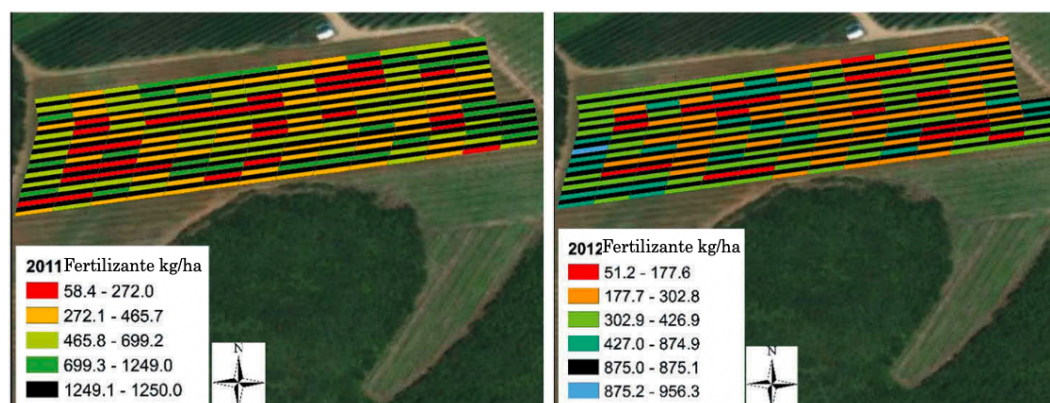


Figura 3.17. Mapas de prescripción de fertilización. Las dosis variables, clasificadas en rangos, se generaron en función de la producción superficial de la cosecha de la temporada anterior (Liakos et al., 2020)

En resumen, la Tabla 3.2. muestra que el uso de tecnologías de aplicación variable de fertilizantes en manzanos, cítricos, perales y naranjos permiten una aplicación más precisa y eficiente de los fertilizantes, con reducciones del insumo que varían entre el 36% y el 61%, y un ahorro promedio del 45%. Las técnicas incluyen el uso de mapas de prescripción basados en la variabilidad de nutrientes en el suelo, la fertilidad del suelo, las condiciones nutricionales de las hojas, el rendimiento de la cosecha de la temporada anterior, y el volumen del dosel de los árboles.

Tabla 3.2. Porcentaje de reducción del uso de fertilizantes al implementar tecnologías de aplicación variable frente a la aplicación uniforme en el cultivo de frutales según diferentes investigaciones

Referencia	Cultivo	Método para la aplicación variable de fertilizantes	Variación %
(Aggelopoulou et al., 2010)	Manzano	Mapas de prescripción (N) en función de variabilidad de nutrientes en el suelo.	-38
(Colaço et al., 2017)	Citricos	Mapas de prescripción basados en la fertilidad del suelo (P y K) y en las condiciones nutricionales de la hoja (N) y mapas de rendimientos de la temporada anterior.	-39
(Vatsanidou et al., 2017)	Peral	Mapas de prescripción (N) en función rendimiento de cosecha de la temporada anterior y fertilidad del suelo.	-59
(Wang et al., 2024)	Manzano	Mapas de prescripción (N, P, K) en función de variabilidad de nutrientes en el suelo.	-36
(Liakos et al., 2020)	Manzano	Mapas de prescripción (N) en función rendimiento de cosecha de la temporada anterior y fertilidad del suelo.	-64
(Zaman et al., 2005)	Naranjos	Mapas de prescripción basados en el tamaño de los árboles escaneados por ultrasonido.	-39
Promedio de reducción			-46,0
Desviación estandar			±12,3

Respecto a la aplicación variable de fitosanitarios la literatura presenta varios estudios en frutales. Según Nackley et al. 2021 en manzanos y viñedos, comparó un sistema de pulverización de fitosanitarios de AV con un sistema de AU. El pulverizador utilizado incorpora un sensor LiDAR que escanea el cultivo y detecta la presencia del árbol y la densidad de la copa que determina el volumen de aplicación del fitosanitario, logrando automatizar el cálculo del volumen de vegetación de los árboles. La velocidad del pulverizador sobre el terreno es medida de forma independiente a través del sensor de radar Doppler, y calcula el momento en que se libera la pulverización sobre el cultivo. La pulverización de AV se realizó a la dosis predeterminada de  $0,073 \text{ l m}^{-3}$  de dosel de cultivo en manzano y de  $0,063 \text{ l m}^{-3}$  de volumen de viñedo. El modo de pulverización de AU descargó un volumen constante independientemente de las características del dosel de  $746 \text{ l ha}^{-1}$  en el huerto de manzanas y  $1032 \text{ l ha}^{-1}$  en el viñedo, según dosis de aplicación convencionales en la zona. El volumen de pulverización se redujo de media en un 71% en el huerto de manzanos y en el viñedo un 71% en el modo de AV en comparación con la AU.

El estudio realizado por L. Chen et al., 2020, utiliza un sistema de pulverización similar al anterior para realizar una AV en manzano y melocotonero. Durante las aplicaciones el sensor láser del pulverizador escanea los árboles de forma instantánea y mediante el programa informático la información se procesa para calcular el volumen del follaje de la copa de los árboles para determinar la cantidad de líquido a pulverizar en cada boquilla, descargando dosis variables dentro del rango de 0 a  $0,6 \text{ l min}^{-1}$  en tiempo real. Durante las aplicaciones de pulverización uniforme todas las boquillas del pulverizador descargaron al mismo tiempo una dosis de  $24,0 \text{ l min}^{-1}$ . Las dosis de aplicación de pulverización uniforme fueron de  $763,3 \text{ l ha}^{-1}$  en manzana y  $507 \text{ l ha}^{-1}$  en melocotón de media durante 2 años. La aplicación variable de pulverización redujo el fitosanitario utilizado un 59% en manzana y 31% en melocotón.

Román et al. 2021, implementan mapas de prescripción de fitosanitarios en viñedos para evaluar la variabilidad espacial mediante imágenes multiespectrales aéreas de 50 cm de resolución, para determinar el índice de densidad de células vegetales (en inglés, plant cell density (PCD)) para clasificar las áreas de dosel con vigor alto o bajo. Se midió el área foliar de cepas representativas para establecer la dosis de fitosanitarios:  $1,12 \text{ l ha}^{-1}$  para vigor bajo y  $1,45 \text{ l ha}^{-1}$  para vigor alto.

Lo que permitió un ahorro promedio del 21% en el uso de fitosanitarios al reducir la dosis en áreas de bajo vigor (comparado con un tratamiento uniforme), sin perjudicar la eficiencia del tratamiento manteniendo las plagas bajo el umbral económico de daño.

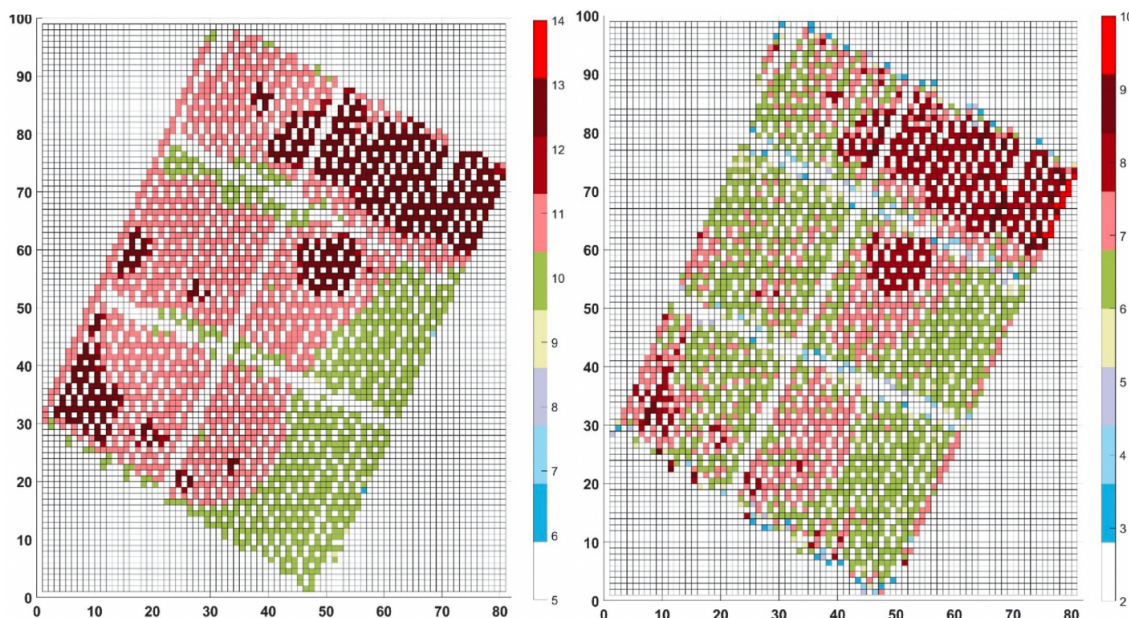


Figura 3.18. Mapa de distribución espacial del tratamiento de pulverización. (izq.) mapa de flujos prescritos; (der.) mapa de mediciones del caudalímetro (Rovira-Más et al., 2024)

En el estudio de Rovira-Más et al. 2024 también se implementan mapas de prescripción mediante el análisis del vigor del dosel de las plantas del cultivo, obteniendo el NVDI mediante cámaras multiespectrales en drones con una resolución de 5 cm por pixel. Generan una gran cantidad de puntos de control georreferenciados dividiendo el cultivo en diversas celdas donde cada una tiene un manejo de aplicación de fitosanitario individualizada (ver Figura 3.18.). Para el caso del olivar la reducción de productos fitosanitarios se estimó en un 35% en comparación con los sistemas tradicionales de manejo.

Según Miranda et al. 2019, demostraron que el uso de tecnología de monitoreo automático de plagas en un cultivo de olivos reduce el uso de plaguicidas en casi un 37% en comparación con el monitoreo y control convencional. Además, la implementación de un sistema de asistencia a la toma de decisiones, que apoya el monitoreo en tiempo real y genera mapas de riesgo periódicos (ver Figura 3.19.), permite modificar en el tiempo el programa fitosanitario. Esto incrementa la precisión en el uso de fitosanitarios y disminuye el impacto de su aplicación sobre los enemigos naturales de la mosca del olivo.

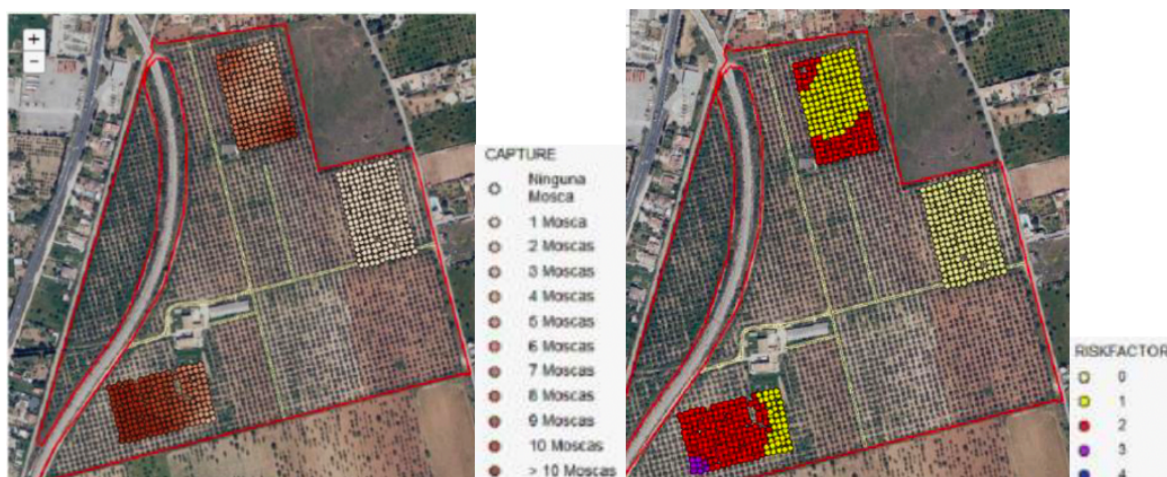


Figura 3.19. Mapa de numero de capturas por trampa (izq.) y mapa de riesgo donde el color indica las áreas según la necesidad de aplicación de insecticidas (der.) (Miranda et al., (2019)

En resumen, el uso de técnicas de aplicación variable de productos fitosanitarios en manzanos, viñedos, olivos y melocotoneros ha demostrado una considerable reducción en el uso de productos fitosanitarios que oscilan entre el 21% y el 71%, con un promedio de ahorro del 46% (ver Tabla 3.3.). Las metodologías incluyen el uso de sensores láser para calcular el volumen de follaje y determinar la cantidad exacta de producto necesario en tiempo real, así como mapas de prescripción basados en índices de vigor del dosel calculados a partir de imágenes multiespectrales, o el seguimiento automatizado de las poblaciones de insectos. Estos resultados sugieren que las técnicas de aplicación variable son altamente efectivas para optimizar el uso de productos fitosanitarios.

La tecnología de riego con aplicación variable busca ajustar el suministro de agua según la variabilidad del campo para mejorar la correspondencia entre la demanda y el suministro (Monaghan et al., 2013). Esto se logra identificando zonas de manejo para maximizar la homogeneidad interna y las diferencias entre ellas. Utilizando sensores o modelos hidrológicos, se diseñan sistemas de riego que aplican variaciones específicas en el suministro para cada zona, optimizando la gestión del riego (Ortuani et al., 2019).

La metodología para el cálculo de necesidades hídricas de cultivo más utilizado es el enfoque estandarizado Penman–Monteith que estima la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) bajo condiciones estándar, como el producto de la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) y el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) que varía según la etapa del cultivo (FAO, 1998). El método que evalúa la evapotranspiración bajo condiciones no estándar ( $ET_c \text{ adj}$ ) es más preciso, debido a que ajusta el  $ET_c$  considerando los factores planta-atmosfera-suelo. El

conocimiento de estos factores es fundamental para programar estrategias de riego, especialmente en el caso de cultivos de árboles frutales donde es crítico conocer el estado hídrico de las plantas (Conesa et al., 2021).

Tabla 3.3. Porcentaje de reducción del uso de fitosanitarios al implementar tecnologías de aplicación variable frente a la aplicación uniforme en el cultivo de frutales

Referencia	Cultivo	Método para la aplicación variable de fitosanitarios	Variación %
Nackley et al., (2021)	Manzano Viñedo	Sensor láser para calcular el volumen de follaje de la copa de los árboles a partir del cual se calculó la cantidad de dosis para cada boquilla en tiempo real.	-73.0
			-73.0
Rovira-Más et al., (2024)	Olivos	Mapa de prescripción según el vigor del dosel, basado en mediciones de NDVI con UAV con cámara multiespectral.	-44.0
L. Chen et al., (2020)	Manzano Melocotonero	Sensor láser para calcular el volumen de follaje de la copa de los árboles a partir del cual se calculó la cantidad de líquido de pulverización para cada boquilla en tiempo real.	-59.0
			-37.0
Miranda et al., (2019)	Olivos	Sistema de apoyo a la toma de decisiones del control de plagas basado en información del monitoreo de cámaras trampa semiautomáticas para generar mapas de riesgo. Aplicación con equipo convencional.	-39.0
(Román et al., 2021)	Viñedo	Mapas de prescripción a partir de imágenes multiespectrales para calcular el índice de densidad de células vegetales y definir mapas de prescripción en dos clases, de vigor alto y bajo.	-29.0
Promedio de reducción			-51,0
Desviación estándar			±17,8

En relación al uso de la AV para optimizar el riego, Bellvert et al. 2020, evaluaron el rendimiento de una metodología integrada, basada en un modelo de consumo de agua y en datos de teledetección, para optimizar el riego de precisión en un viñedo comercial durante dos campañas. El diseño del sistema de riego consideró crear sectores de riego según clasificación del mapa de NDVI, junto con la individualización de "puntos inteligentes" seleccionados visualmente en la ubicación más representativa por sector y categoría de NDVI. Cada "punto inteligente" estaba compuesto por seis vides, donde se realizaron mediciones fisiológicas y estructurales de la vid cada dos semanas como datos para el modelamiento del cultivo. Las prescripciones de riego se llevaron a cabo de forma independiente en cada sector de riego de acuerdo con los resultados del modelo. La

estrategia de riego de no precisión consistió en simular las prescripciones de riego según la evapotranspiración del dosel completo. El programa de riego de precisión dio lugar a una reducción promedio del consumo de agua de un 26%.

En el estudio de Ortuani et al. 2019, crearon mapas de prescripción de riego en viñedos identificando dos tipos de suelo homogéneos basados en la resistividad eléctrica y la textura. Consideraron el agua total disponible para cada campo mediante sensores y estimaron la evapotranspiración utilizando el modelo NDVI. La implementación de este sistema de riego de precisión logró un ahorro de agua del 18% en comparación con la estrategia de riego no preciso que se utilizaba de acuerdo con la experiencia del agricultor.

El riego deficitario (RD) es una estrategia en la que la cantidad de agua aplicada es menor que la necesaria para satisfacer completamente las necesidades hídricas del cultivo, con el objetivo de aumentar la eficiencia del uso del agua eliminando riegos con poco impacto en el rendimiento. Una de las estrategias más importantes en árboles frutales es el RD controlado en el que se aplican restricciones de agua en períodos no críticos, cuando el crecimiento del fruto es menos sensible al déficit hídrico, mientras se cubren completamente las necesidades de agua durante el resto de la temporada de crecimiento (De la Rosa et al., 2016). En el estudio de Conesa et al. 2021, realizaron un experimento de campo de 6 años en un huerto de nectarinas empleando riego de precisión en una estrategia de RD. En el tratamiento control, la dosis de riego se basaba en cubrir el 100% de la ETC, mientras que el sistema de riego de precisión estaba basado en sensores de agua del suelo para monitorear el contenido volumétrico de agua del suelo (CVAS) mediante sondas de capacitancia de profundidad múltiple. El protocolo de riego automatizado para el riego de precisión se basó en los valores umbrales de CVAS en tiempo real, establecidos según la metodología de RD. El riego se activaba automáticamente actuando sobre las electroválvulas mediante un sistema de telemetría, cuando los valores medios de CVAS en el perfil de suelo de 0-0,5 m alcanzaban el valor umbral de RD y se detenía cuando se alcanzaba el valor de capacidad de campo. En el escenario de baja disponibilidad de agua se ahorró un 43% de agua en comparación con un riego convencional. A pesar de este ahorro, no hubo diferencias significativas en el rendimiento de producción de nectarina. Según Mounzer et al. 2008 usando un procedimiento similar en melocotoneros, registra un 18% en el ahorro de agua en riego de precisión en comparación con el tratamiento de riego programado convencionalmente. En este caso la estrategia de riego de precisión no aplicaba umbrales propios del riego deficitario como sí lo hacía el trabajo de Conesa et al. 2021.

Tabla 3.4. Porcentaje de reducción del agua de riego al implementar tecnologías de aplicación variable o riego de precisión frente a las estrategias de riego tradicional en el cultivo de frutales

Referencia	Cultivo	Método para la aplicación variable de riego	Variación %
(Bellvert et al., 2020)	Viñedo	Mapa de prescripción basado en un modelo de consumo de agua de la vid y en datos de teledetección (mapa de NDVI).	-26
(Ortuani et al., 2019)	Viñedo	Mapa de prescripción basado en las características de los suelos, el contenido en agua del suelo determinado mediante sensores y las necesidades de agua del cultivo utilizando mapa NDVI.	-18
(Conesa et al., 2021)	Nectarino	Sensores de agua del suelo para supervisar el contenido volumétrico de agua del suelo estableciendo un protocolo de riego automatizado en tiempo real (riego deficitario).	-43
(De la Rosa et al., 2016)	Nectarino	Sensores de agua del suelo para supervisar el contenido volumétrico para programa de riego automatizado variable (deficitario).	-23
(Mounzer et al., 2008)	Melocotonero	Sensores de agua del suelo para supervisar el contenido volumétrico de agua del suelo estableciendo un protocolo de riego automatizado en tiempo real.	-18
Promedio de reducción			-26,0
Desviación estándar			+10,3

El estudio de De la Rosa et al. 2016, realizado en un huerto comercial de nectarinas tempranas evaluó los efectos del RD y diferentes niveles de carga de fruta sobre el crecimiento vegetativo, el estado hídrico de las plantas y la calidad de la fruta. Los resultados indicaron que el RD regulado aumentó la eficiencia en un 23% en el uso del agua comparado el tratamiento de control, sin comprometer significativamente la producción o la calidad de la fruta.

En resumen, la Tabla 3.4. muestra como el uso de técnicas de riego variable en viñedos, huertos de perales, huertos de nectarinas y huertos de melocotones ha demostrado significativos ahorros de agua. Los métodos incluyen el uso de mapas de prescripción basados en características del suelo, datos NDVI obtenidos de la teledetección y sensores de humedad del suelo. Las reducciones en el uso de agua varían entre un 18% y un 43%, con un ahorro promedio de alrededor del 26%. Estos hallazgos sugieren que los métodos de riego de precisión son efectivos para optimizar el uso del agua en diversos cultivos, adaptando las necesidades de riego a condiciones específicas y reduciendo el consumo total de agua.

### 3.1.9 La agricultura de precisión como escenario de estudio en el ACV

Existen estudios que han evaluado el porcentaje de reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) mediante el uso de diversas tecnologías de AP en diferentes cultivos, utilizando el ACV ambiental u otras metodologías.

La implementación de técnicas de aplicación variable de insumos utilizando sensores de proximidad ha demostrado una reducción del 15 % en las emisiones de GEI en la producción de patatas en Estados Unidos (Bohman et al., 2019), y una disminución del 22.6 % en las emisiones de GEI en la producción de cebollas en Inglaterra mediante riego de dosis variable (El Chami et al., 2019). Además, en viñedos, el uso de aplicación variable en fertilización el estudio reporta una reducción del 17.2 % en las emisiones de GEI (Balafoutis et al., 2017).

El uso de pulverizadores equipados con sensores de detección de cultivos en una plantación de manzanas en Polonia permitió una reducción del 29 % en las emisiones de GEI (Berger et al., 2022). El uso de sensores ópticos en producción de trigo de invierno reveló una reducción del 8.6 % en GEI (Medel-Jiménez et al., 2022).

En un sistema de rotación de cultivos de cereales durante tres años (cebada, soja, trigo, colza), se destacó el potencial de los sensores de proximidad y remotos para reducir el índice de calentamiento global en un 17 % (Medel-Jiménez et al., 2024). El uso de tecnologías de guiado en la producción de avena en Dinamarca mostró una disminución del 50 % en las emisiones de GEI (Gasso et al., 2014). Asimismo, la implementación de tecnologías inteligentes basadas en inteligencia artificial logró una reducción del 26 % en las emisiones de GEI en cultivos de almendros en Portugal (Berger et al., 2022).

Actualmente, no existe ningún estudio que compare directamente la producción convencional de fruta de hueso con la agricultura de precisión-digital mediante la metodología ACV, ni desde la perspectiva de reducción de insumos ni desde el aumento de rentabilidad. La falta de investigaciones comparativas en este ámbito impide una evaluación objetiva de los beneficios y desventajas de cada método de producción.

Para una evaluación completa y efectiva de la sostenibilidad integral en la producción de fruta de hueso, es esencial aplicar metodologías rigurosas de ACV. Sin embargo, los estudios de ACV en la producción frutal son muy escasos, y aún menos los que se centran en la fruta de hueso. La investigación existente generalmente aborda un solo aspecto de la sostenibilidad del sistema productivo (ambiental, económico o social) de manera aislada. Para tomar decisiones

informadas y fomentar la adopción coherente de tecnologías de agricultura digital-precisión, es necesario realizar estudios comparativos de ACV que analicen tanto los escenarios convencionales como los de AP, considerando todos los parámetros relevantes de sostenibilidad.

## 3.2 Metodología de ACV Ambiental

El ACV es un método para medir los impactos ambientales de un producto, un servicio, una empresa o un territorio. Se consideran los impactos de todas (o la mayoría) de las etapas involucradas en el ciclo de vida. Es decir, se abarca el análisis desde la extracción de materias primas hasta el fin de la vida útil de los productos o servicios de la empresa, pasando por todos los procesos intermedios (EC-JRC-IES, 2010).

La metodología surgió en la década de 1960, con la definición de los conceptos básicos. Hasta principios de la década de 1990, los estudios de ciclo de vida se centraban en evaluar los flujos de materiales, energía y residuos de un producto bajo diversas denominaciones, como análisis de perfiles ambientales y de recursos, balance ecológico y análisis ambientales integrales (Benoit et al., 2019).

La evolución del ACV en el Comité Técnico 207, responsable de la normalización en sistemas de gestión ambiental y herramientas de apoyo para el desarrollo sostenible, ha seguido diversas fases:

- Evaluaciones enfocadas en un único impacto, como la huella de carbono (ISO 14067) y la huella hídrica (ISO 14046).
- Extensión del análisis a aspectos económicos y sociales, como el coste del ciclo de vida (contabilidad de costos del flujo de materiales CCFM ISO 14051) y las evaluaciones de ecoeficiencia (ISO 14045).
- Evaluaciones aplicadas a organizaciones o sectores completos (ISO 14072), como los ACVs alcance 3 (emisiones indirectas de la cadena de valor).
- Inclusión de herramientas de transparencia como las declaraciones ambientales de producto (EPD) ISO 14025) y otras etiquetas ambientales.
- Evaluaciones enfocadas en un único impacto, como la huella de carbono (ISO 14067) y la huella hídrica (ISO 14046).

Además, aparecen nuevas especificaciones técnicas, como la ISO/TS 14071 y 14072 (“International Organization for Standardization/ Technical Specification”), que están orientadas a mejorar la revisión crítica y a facilitar la implementación

del ACV en organizaciones, consolidando las normas ISO 14040/44 como el estándar global de referencia para evaluaciones ambientales (Suppen, 2013).

En concreto, el ACV ambiental (ACV-A) es una metodología que se utiliza para evaluar los impactos ambientales y el uso de recursos a lo largo de todas las etapas del ciclo de vida de un producto, desde la obtención de materias primas hasta la gestión de residuos. Esta herramienta proporciona una visión integral de las interacciones ambientales y se emplea ampliamente para apoyar la toma de decisiones en la gestión ambiental, permitiendo comparar opciones para minimizar los impactos negativos (Benoit et al., 2019).

En 1990, la Sociedad de Toxicología y Química Medioambiental (SETAC, por sus siglas en inglés) organizó talleres con el objetivo de desarrollar un método estandarizado para el ACV ambiental, que serviría como base para la norma ISO 14040:2006. Este documento proporciona un marco técnicamente riguroso para llevar a cabo ACV ambientales.

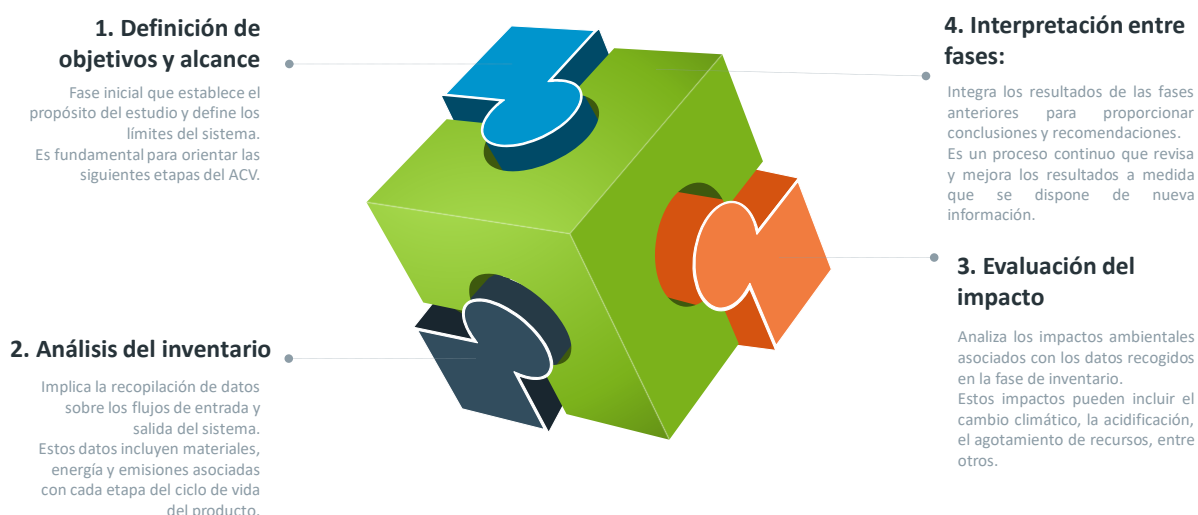


Figura 3.20. Etapas de un ACV según ISO 14040:2006

A continuación, se describen con más detalle cada una de ellas (EC-JRC-IES, 2010).

### 3.2.1 Definición de objetivo y alcance

Esta fase es el primer paso, y es quizás el eslabón más significativo de un ACV debido a que se define el objetivo esperado del estudio, el alcance del sistema y la unidad funcional (UF).

El objetivo del análisis debe abordar las razones para llevar a cabo la investigación y su aplicación. Los objetivos más usuales son evaluar los impactos de un sistema para determinar su magnitud y descubrir oportunidades de mejora

ambiental, así como para realizar comparaciones con otros escenarios para respaldar la toma de decisiones basada en criterios ambientales (UNEP, 2011).

La UF tiene como misión normalizar los datos del inventario, cuantificando las funciones o características del rendimiento del producto o sistema en estudio, para garantizar una base común en la comparación de resultados de ACV-A.

En cuanto al alcance, este debe definir la profundidad, amplitud y nivel de detalle del estudio, siendo coherente con los objetivos. En la definición del alcance, se deben abordar cuestiones como las características del sistema o producto, funciones, límites del sistema, asignación de cargas ambientales (atribucional o consecuencial), categorías de impacto, metodologías de evaluación de impacto, requisitos de calidad de datos, suposiciones (*assumptions*), revisión crítica y formato del informe requerido.

Dentro de los límites del sistema se puede diferenciar entre los siguientes tipos (Figura 3.21.): "de la cuna a la puerta" (from cradle to gate) recopila datos desde la extracción de materias primas hasta la fabricación y montaje del producto; "de la cuna a la tumba" (from cradle to grave) abarca desde la extracción de materias primas hasta la devolución de residuos o emisiones al medio ambiente; "de la puerta a la puerta" (from gate to gate) se limita a lo que ocurre dentro del perímetro de la empresa, excluyendo el suministro y la distribución; "de la cuna a la cuna" (from cradle to cradle) adopta una perspectiva de economía circular, en la que los productos, emisiones, agua y residuos al final de su vida útil vuelven al sistema, cerrando el ciclo (Zanni et al., 2020).



Figura 3.21. Modelos de ciclo de vida en ACV (adaptado de Ecochain, 2024)

A menudo los ciclos de vida de distintos productos están interconectados, por ejemplo, cuando la fabricación de un producto depende de la producción de otro y no pueden separarse. Existen dos enfoques principales para abordar esta situación, el primero es el enfoque consecucional, y se aplica en la modelación consecucional cuando se desea investigar las consecuencias de una modificación en comparación con una situación de referencia. El segundo es el enfoque de asignación, y se aplica en la modelización atribucional cuando se desea conocer el impacto ambiental de un producto o sistema y los puntos críticos en su ciclo de vida, incluyendo todos los flujos desde la extracción de materias primas (cuna) hasta la puerta del proveedor del producto (puerta) o fin de vida (Goedkoop et al. 2016).

### 3.2.2 Análisis de inventario de ciclo de vida (AICV)

En la presente etapa, se recopilan y procesan todas las entradas y salidas relacionadas con el sistema, basado en inventario de cada etapa de un ACV. La selección de datos suele agruparse en procesos unitarios, según la norma ISO 14040:2006.

El AICV se desarrolla a partir de las etapas de a) preparación de la recopilación de datos, en la que se organizan y preparan los recursos necesarios. Incluye la identificación de las fuentes de datos y la planificación del proceso de recolección; b) recopilación de los datos necesarios sobre los flujos de entrada y salida del sistema. Incluye la obtención de datos de materiales, energía y emisiones; c) definición de los datos recopilados para clasificarlos adecuadamente. Esta fase asegura que los datos sean consistentes y adecuados para el análisis; d) asociación de los datos definidos con los procesos unitarios específicos que conforman el ciclo de vida del producto. Esta asociación permite una evaluación detallada de cada etapa del ciclo de vida; e) consolidación de datos, en la que los datos asociados se consolidan en un conjunto de datos cohesivo. Esta fase asegura que todos los datos relevantes estén integrados y listos para la interpretación; f) modificación de los límites del sistema ya que, a partir de los datos consolidados, se pueden realizar ajustes en los límites del sistema para reflejar mejor la realidad del ciclo de vida. Las modificaciones en los límites del sistema pueden requerir ajustes en las fases anteriores, como la preparación y recopilación de datos, para asegurar la precisión y la integridad del análisis.

Este esquema de desarrollo del AICV proporciona una visión detallada del proceso de recopilación y análisis de datos en el ACV, destacando la importancia de la iteración y la retroalimentación para mejorar continuamente la evaluación (Yang et al., 2019).

### 3.2.2.1 Bases de datos de inventario secundarios de ciclo de vida

La etapa de AICV se ve simplificada por la disponibilidad de bases de datos internacionales que recopilan información de inventarios de diversos procesos unitarios presentes en la actividad productiva global.

En la Tabla 3.5. se presenta un resumen de las principales bases de datos disponibles para los analistas de ACV-A. Actualmente existe un mayor número de bases de datos confeccionadas a nivel local de distintos países que no se han incluido en la presente tabla ya que son representativas sólo de esas zonas.

Tabla 3.5. Principales bases de datos genéricas y del área agrícola

Base de datos	Características
Ecoinvent (ecoinvent, 2023)	Contiene datos de inventarios internacionales del ciclo de vida industrial sobre suministro de energía, extracción de recursos, suministro de materiales, productos químicos, metales, agricultura, servicios de gestión de residuos y servicios de transporte con más de 18.000 conjuntos de datos. Cada conjunto de datos se proporciona como proceso unitario y proceso de sistema agregado.
Environmental Footprint (EF) (European Commission, 2023a)	Base de datos de huella medioambiental que se encuentra disponible para productos representativos, siguiendo las reglas actuales de la categoría de huella ambiental de productos (en inglés PEFCR) y las reglas del sector de huella ambiental de la organización (en inglés OEFSR). El conjunto de referencias de la base de datos EF 3.1 incluye datos secundarios de inventario de ciclo de vida que cumplen con los estándares EF establecidos por diversos proveedores.
Agri-footprint (Blonk, 2023)	Base de datos integral y de alta calidad de inventario del ciclo de vida (ICV) con un enfoque específico en el sector agrícola y alimentario. Incluye datos sobre diversos productos agrícolas, como alimentos, piensos y productos agrícolas intermedios. Desde su inicio en 2014 ha sido sometida a revisiones críticas y actualmente goza de amplia aceptación en la industria alimentaria, la comunidad de ACV, la comunidad científica y las instituciones gubernamentales.

Base de datos	Características
<p style="text-align: center;">Agribalyse (AGRIBALYSE®, 2020)</p>	<p style="text-align: center;">Base de datos ICV francesa para el sector agrícola y alimentario. La versión 3.1 publicada en 2022, comprende los ICV de 2.600 productos agrícolas y alimentarios producidos y/o consumidos en Francia, combinando un enfoque basado en la producción y otro en el consumo.</p>
<p style="text-align: center;">EXIOBASE (EXIOBASE, 2015)</p>	<p style="text-align: center;">Base de datos de input-output ambientalmente extendida que ofrece una descripción detallada de la economía global y sus efectos ambientales. Proporciona una alta resolución sectorial y espacial, cubriendo 44 países (28 miembros de la UE y 16 economías principales) y cinco regiones del resto del mundo, permitiendo un análisis completo de las cadenas de valor globales. Proporciona una serie temporal de tablas input-output multirregionales desde 1995 hasta 2011, lo que permite analizar las dinámicas de las presiones ambientales de las actividades económicas a lo largo del tiempo. Esto es crucial para evaluar los cambios estructurales y las tendencias a largo plazo.</p>

Ecoinvent ofrece una extensa colección de datos de inventario de ciclo de vida que abarca una amplia gama de sectores industriales. Los datos de ecoinvent son conocidos por su transparencia y consistencia, lo que facilita la comparación y replicación de estudios. Siendo esto crucial para la credibilidad y validez de los resultados de ACV (Lopes Silva et al., 2019). La base de datos se actualiza regularmente para incluir nuevos procesos y mejoras en la calidad de los datos, lo que garantiza que los usuarios tengan acceso a la información más reciente y precisa disponible (Saade et al., 2019). Ecoinvent incluye datos específicos para una variedad de cultivos y prácticas agrícolas, lo que permite a los usuarios realizar evaluaciones precisas de los impactos ambientales de los productos agroalimentarios. Estos datos abarcan desde el uso de fertilizantes y pesticidas hasta las emisiones generadas por la maquinaria agrícola (Corrado et al., 2018). La base de datos es adaptable a diversos sistemas agrícolas, lo que permite a los usuarios comparar diferentes métodos de producción y elegir las prácticas más sostenibles (Dijkman et al., 2017).

La base de datos Ecoinvent proporciona información para procesos unitarios y de sistemas. El proceso unitario es más detallado porque analiza una etapa específica del proceso, como la producción de fruta. Solo considera las emisiones y recursos utilizados en esa etapa, pero incluye referencias a etapas anteriores (p.e. producción de fertilizantes). El proceso de sistema, tiene una visión más general, donde evalúa todo el ciclo de vida del producto, desde la extracción de materias primas hasta el final de su vida útil. Este enfoque proporciona una visión más completa del impacto ambiental, pero no detalla las emisiones y recursos utilizados en cada etapa individual (Goedkoop et al., 2016).

La base de datos EF se basa en una metodología armonizada propuesta por la Comisión Europea, que facilita la comparación de los resultados de diferentes productos y organizaciones bajo un marco unificado. Esto es particularmente útil para evaluar el desempeño ambiental en un contexto regulado y estandarizado (Saouter et al., 2019).

EF incluye una amplia gama de categorías de impacto, como el impacto en los ecosistemas de agua dulce y la toxicidad, que pueden no estar tan detalladamente cubiertas en otras bases de datos como Ecoinvent. Esto permite una evaluación más exhaustiva de los impactos ambientales específicos (Golsteijn & Vieira, 2020). EF proporciona datos detallados y específicos para evaluar los impactos ambientales de los productos agrícolas, incluyendo el uso de agua y tierra, así como las emisiones de gases de efecto invernadero (Litskas et al., 2020). Esto permite realizar análisis más precisos y específicos para la agricultura y la producción de alimentos.

EXIOBASE es compatible con el Sistema de Cuentas Ambientales y Económicas (SEEA en inglés), proporcionando un alto nivel de detalle sectorial junto con múltiples cuentas satélite ambientales y sociales. Esto permite un análisis integrado de los impactos ambientales y económicos, facilitando una evaluación más holística de la sostenibilidad (Wiebe et al., 2018).

Las normas ISO 14040:14044:2006 enfatizan la necesidad de análisis complementarios de calidad de datos durante la fase de Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV). Estos análisis abordan la incertidumbre (confiabilidad de los resultados con los datos utilizados) y la sensibilidad (impacto de los cambios en datos y decisiones metodológicas).

### 3.2.2.2 Análisis de incertidumbre de datos

Todos los datos provenientes de bases de datos de modelos de ciclo de vida presentan cierta incertidumbre, la cual puede deberse a la variabilidad de los datos, la representatividad del modelo o la incompletitud del mismo. El cálculo de la incertidumbre permite una interpretación de los resultados más transparente y precisa.

El programa SimaPro tiene la opción de analizar la calidad del inventario mediante el análisis de Montecarlo que utiliza la herramienta de la Matriz de Pedigree, que permite evaluar la calidad de datos de inventario mediante la asignación de puntuaciones en la evaluación de los criterios de fiabilidad, completitud, temporalidad, cobertura geográfica y representatividad tecnológica (ver Figura 3.22.). Luego se transforman en factores cuantitativos para ajustar las distribuciones de incertidumbre de los datos (Weidema y Wesnæs 1996).

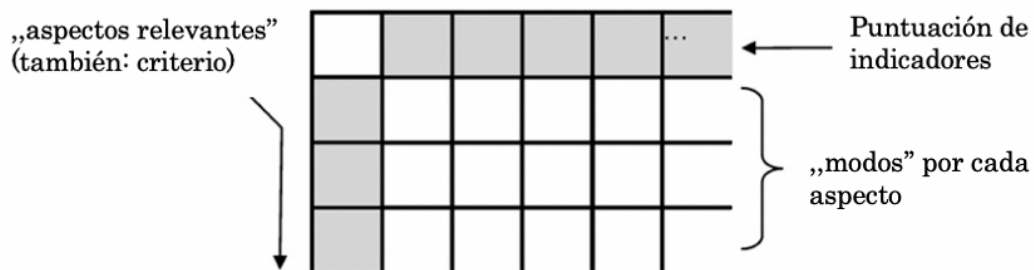


Figura 3.22. Concepto de la matriz de Pedigree (adaptado de Ciroth, 2009)

Las calificaciones de la matriz de Pedigree se pueden usar para definir las distribuciones de probabilidad que se utilizarán en el análisis de Montecarlo. El análisis de Montecarlo es una técnica estadística utilizada para evaluar la incertidumbre en los resultados de un ACV. Este método consiste en simular miles de iteraciones del modelo de ACV utilizando valores de entrada variables basados en distribuciones de probabilidad, en lugar de valores únicos y fijos. Esto genera una distribución de resultados posibles, proporcionando una visión probabilística de los impactos ambientales evaluados. Por ejemplo, una alta incertidumbre en la fiabilidad puede resultar en una distribución más amplia de posibles valores para esa variable en las simulaciones de Montecarlo.

Al integrar la matriz de Pedigree con el análisis de Montecarlo, se puede obtener una evaluación más robusta y confiable de la incertidumbre en el ACV. Esto ayuda a identificar cuáles datos tienen mayor impacto en la incertidumbre del resultado y, por ende, donde se deben enfocar los esfuerzos de mejora de datos (Goedkoop et al., 2016).

### 3.2.2.3 Análisis de sensibilidad

Un análisis de sensibilidad examina cómo los supuestos (*assumptions*) influyen en los resultados del ACV. Estos supuestos, como el origen de la energía o el tipo de transporte p.e., son datos preliminares que se utilizan para etapas futuras del ciclo de vida, al modificarlos y recalcular el ACV en el software, se puede comprender mejor su impacto en los resultados finales (Goedkoop et al., 2016).

### 3.2.3 Evaluación del impacto ambiental de ciclo de vida (EIACV)

La evaluación del impacto es la parte central de un ACV. Según los datos proporcionados por el análisis de inventario sobre consumo y emisiones, se evaluará el impacto medioambiental del producto (Finnveden et al., 2009), asociando los datos del inventario con los indicadores de categorías de impacto ambiental. En la Figura 3.23. se presentan las cuatro fases que componen la EIACV: clasificación, caracterización, normalización y valoración, siendo las dos primeras obligatorias según la norma ISO 14040 (2006).

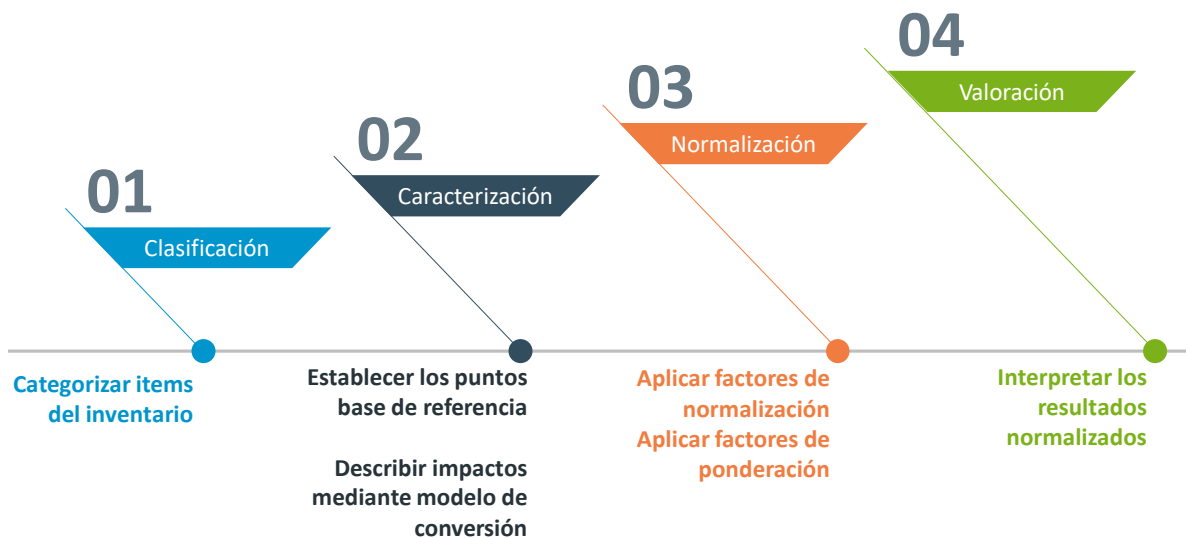


Figura 3.23. Etapas de la evaluación de impacto ACV (adaptado de Yang et al., 2019)

La clasificación asocia los inputs y outputs de insumos y de energía inventariados en el ACV a la categoría de impacto ambiental correspondiente. Por ejemplo, durante la fase de clasificación, todos los inputs y outputs que resultan en emisiones de gases de efecto invernadero se asignan a la categoría de cambio climático. De manera similar, aquellos que resultan en emisiones de sustancias que agotan la capa de ozono se clasifican en la categoría de agotamiento del ozono. En algunos casos, un input u output puede contribuir a más de una categoría de

impacto ambiental (p.e., los clorofluorocarbonos (CFC) contribuyen tanto al cambio climático como al agotamiento del ozono) (Zampori & Pant, 2019).

La caracterización en un ACV establece puntos de referencia para cuantificar y comparar los impactos ambientales generados por las emisiones y el consumo de recursos de un producto. Los datos de inventario se convierten en impactos ambientales utilizando factores de caracterización y modelos de conversión.

Estos modelos, basados en conceptos de física, química, biología y toxicología, incluyen modelos de carga, equivalentes, comportamiento químico, y exposición-efecto. El modelo equivalente, el más común, utiliza sustancias de referencia y factores de caracterización para medir el impacto, lo que permite expresar el efecto invernadero en equivalentes de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> eq), donde 1 kg de CH<sub>4</sub> equivale a 25 kg de CO<sub>2</sub> eq (Yang et al., 2019).

La normalización en un ACV, ajusta los resultados de la caracterización mediante factores de normalización para comparar las contribuciones de las categorías de impacto ambiental en relación con una unidad de referencia, generando resultados adimensionales. Dado que estos valores no indican la gravedad de los impactos, se recurre a la ponderación, que aplica factores para reflejar la importancia relativa de cada categoría de impacto y permite combinar varias categorías en un único índice de impacto ambiental (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006).

La última etapa es la valoración, donde la evaluación o interpretación de los resultados, es el proceso final en el que se revisan, verifican y analizan los resultados obtenidos de las fases anteriores para extraer conclusiones relevantes, identificar limitaciones y proporcionar recomendaciones claras y prácticas.

### 3.2.3.1 Categorías de impacto Ambiental

Se define como un conjunto de efectos ambientales relacionados agrupados bajo un descriptor común. Estas categorías permiten clasificar y cuantificar los impactos potenciales de un producto, proceso o servicio en diferentes áreas de preocupación ambiental. Las categorías de impacto ambiental se utilizan para estructurar y simplificar la evaluación de impactos, facilitando la interpretación de los resultados del ACV. Son ejemplos comunes de categoría de impacto Cambio Climático (Global Warming Potential - GWP), Acidificación, Eutrofización, o Toxicidad humana (Hauschild, 2018).

Aunque se ha expuesto en el apartado anterior y a modo de clarificación para entender la Tabla 3.6., se recuerda que un indicador de impacto es una métrica

cuantificable que traducen el efecto ambiental en una categoría específica de las emisiones y el uso de recursos en términos que puedan ser evaluados (Esnouf et al., 2019). Por ejemplo, el potencial de calentamiento global se mide en kilogramos de CO<sub>2</sub> equivalente, que es un indicador de impacto para la categoría de cambio climático. Por otro lado, un factor de caracterización es un coeficiente utilizado para convertir una cantidad de una emisión o uso de recursos en una medida de impacto ambiental en una categoría específica. Estos factores son esenciales para la fase de caracterización en el ACV, donde los datos de inventario se transforman en impactos ambientales cuantificados (Qin & Suh, 2021).

Tabla 3.6. Resumen de las categorías e indicadores de impacto ambiental del método EF3.1

Categoría de impacto / Indicador	Unidad	Descripción
Cambio climático / Potencial de calentamiento global (PCG)	kg CO <sub>2</sub> -eq	El potencial de calentamiento global es provocado por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), que tienen la capacidad de absorber la radiación infrarroja y con ello calentar la atmósfera. El PCG de una sustancia es la ratio entre el aumento de la absorción infrarroja que causa 1 kg de dicha sustancia respecto a la que causa 1 kg de CO <sub>2</sub> . Como los GEI presentan distintos tiempos de residencia en la atmósfera, se puede calcular para horizontes temporales de 20 años, 100 años, o 500 años. (IPCC, 2019).
Agotamiento del ozono / Potencial de agotamiento de ozono (PAO)	kg CFC-11- eq	Las emisiones provenientes de productos químicos recalcitrantes contienen átomos de cloro y bromo. Cuando estos alcanzan la estratosfera, desencadenan reacciones que resultan en la descomposición de las moléculas de ozono, actuando como catalizadores de radicales libres (WMO, 2003). El agotamiento del ozono estratosférico es el responsable de la exposición dañina a la radiación ultravioleta (UV-B) (Goedkoop et al., 2009). Los impactos potenciales de las sustancias relevantes para el agotamiento del ozono se expresan en términos de su equivalente en kilogramos de

Categoría de impacto / Indicador	Unidad	Descripción
		triclorofluorometano (Freón-11 y R-11), utilizando como unidad el kg de CFC-11 equivalente (Zampori & Pant, 2019).
Formación de oxidantes fotoquímicos  /  Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC-eq	El ozono se forma en la atmósfera como resultado de reacciones fotoquímicas entre NO <sub>x</sub> y compuestos orgánicos volátiles no metánicos (NMVOCs). Este gas puede inflamar las vías respiratorias y dañar los pulmones, aumentando la frecuencia y gravedad de enfermedades como el asma y la EPOC. También puede afectar negativamente a la vegetación, reduciendo el crecimiento y la producción de semillas, entre otros efectos. La formación de ozono depende de factores meteorológicos y concentraciones de NO <sub>x</sub> y NMVOCs (M. Huijbregts et al., 2016).
Acidificación  /  Potencial de acidificación terrestre	kg mol H <sup>+</sup>	La liberación de gases principalmente SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , y NH <sub>3</sub> al aire, al agua y al suelo, en el proceso de combustión (calefacción, transporte, etc.), generan la acumulación de estas sustancias inorgánicas en la atmosfera generando cambios en los niveles de acidez en el suelo provocando variaciones en la presencia de especies vegetales. El impacto potencial de las sustancias acidificantes, convierte en el equivalente de moles de hadrón (forma catiónica de hidrógeno atómico), mol H <sup>+</sup> equivalente (Goedkoop et al., 2009).
Eutrofización - agua dulce, marina y terrestre  /  Potencial de Eutrofización (PE)	kg PO <sub>4</sub> -eq / kg N-eq / Mol N-eq	El enriquecimiento en macronutrientes como fósforo (agua dulce) y nitrógeno (agua salada) estimula el crecimiento de algas y otras especies, es el resultado de actividades humanas principalmente, generando cambios en la calidad ecológica del lugar. El Potencial de eutrofización se calcula considerando el incremento marginal de la concentración de cada nutriente en el medio acuático o terrestre debido a un incremento marginal de su emisión al aire, suelo o

Categoría de impacto / Indicador	Unidad	Descripción
		<p>agua (Zampori &amp; Pant, 2019). El impacto potencial de las sustancias que contribuyen a la eutrofización terrestre se convierte en el equivalente de moles de nitrógeno (mol N equivalente).</p>
<p>Toxicidad humana / Potencial de toxicidad en humanos (PTH)</p>	<p>CTUh</p>	<p>Se refiere a los posibles impactos en la salud humana causados por la absorción de sustancias tóxicas con y sin efectos cancerígenos a través del aire, el agua y el suelo. Actualmente no se miden los efectos directos de los productos en los seres humanos. La unidad de medida se establece según la comparativa de toxicidad humana (CTUh) entre fuentes, basado en un modelo llamado USEtox (UNEP, 2016).</p>
<p>Formación de material particulado (FMP) / Potencial de formación de material particulado</p>	<p>kg PM<sub>2.5-10</sub></p>	<p>El material particulado puede ser de origen antropogénico o provenir de fuentes naturales. Algunas de estas partículas son emitidas directamente a la atmósfera (emisiones primarias) y otras son emitidas como gases por reacciones químicas de condensación entre moléculas reactivas que forman partículas en la atmósfera (emisiones secundarias). El material particulado se forma en el aire a partir de emisiones de SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub>, entre otros elementos. La exposición crónica al material particulado (MP), especialmente al MP<sub>2,5</sub>, está asociada con efectos de mortalidad, mientras que las partículas con un diámetro de 2,5–10 µm (MP<sub>2,5-10</sub>) están relacionadas con enfermedades respiratorias (Huijbregts et al., 2016).</p>
<p>Uso de suelo / Potencial uso de suelo (ocupación - transformación)</p>	<p>Dimensión · año</p>	<p>Se centra en dos tipos de uso de la tierra: transformación y ocupación. La transformación implica cambiar la cobertura terrestre, mientras que la ocupación se refiere al uso de la tierra durante un tiempo determinado. Durante la transformación, la tierra se adapta a una nueva función, como eliminar</p>

Categoría de impacto / Indicador	Unidad	Descripción
		<p>la vegetación original. En la ocupación, la tierra se utiliza por un tiempo específico. Después de su uso, la tierra pasa por una fase de relajación, volviendo a su estado natural, aunque puede tener impactos negativos en la biodiversidad. Los factores de caracterización para la ocupación y transformación se expresan en diferentes unidades y se multiplican por los datos del inventario del ciclo de vida para calcular el daño total al ecosistema (Canals et al., 2007).</p>
<p>Uso del Agua / Potencial de agua agotada</p>	<p>m<sup>3</sup> eq.</p>	<p>El consumo de agua altera su disponibilidad y genera competencia entre sus usos. Afecta a los ecosistemas terrestres y acuáticos, reduciendo la vegetación y la fauna. También afecta al riego agrícola disminuyendo la producción de cultivos y potenciando problemas sociales. El impacto potencial se expresa en m<sup>3</sup> de uso de agua relacionado con la escasez local de uso directo e indirecto (UNEP, 2016).</p>
<p>Agotamiento de recursos minerales y fósiles / Potencial de agotamiento mineral o fósil</p>	<p>MJ (fósiles) o kg Sb eq (minerales).</p>	<p>La tierra contiene una cantidad finita de recursos no renovables, como es el caso de combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas. El agotamiento de los combustibles fósiles puede conducir a su no disponibilidad para las generaciones futuras. La cantidad de materiales que contribuyen al uso de recursos fósiles se convierten en Mega julios (MJ). La cantidad de materiales que contribuyen al agotamiento de los recursos minerales se convierte en equivalentes de kilogramos de antimonio (kg Sb eq) (Huijbregts et al., 2016).</p>

### 3.2.3.2 Métodos de evaluación

Los especialistas en el área de ACV han desarrollado métodos de caracterización, normalización y ponderación, clasificándolos en métodos de punto medio (en inglés, midpoint) y punto final (inglés, endpoint) (ver Figura 3.24).

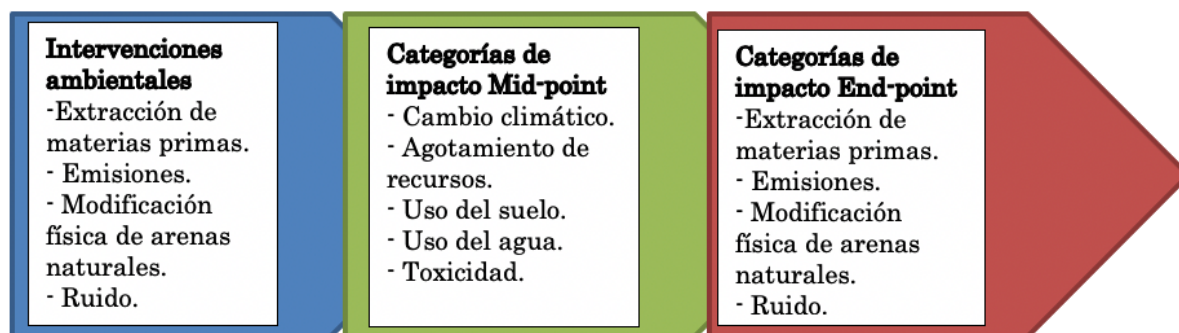


Figura 3.24. Esquema general de la Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida, donde se vincula los resultados del inventario de ciclo de vida a través de las categorías impacto de punto medio con las categorías de impacto de punto final (adaptado de UNEP, 2011)

Los métodos de punto medio ofrecen resultados del impacto potencial por categoría de impacto, proporcionando una evaluación precisa y detallada de los impactos específicos. La metodología y los datos para calcular los puntos medios están bien establecidos, son consistentes y permiten una comprensión técnica clara de los impactos. Sin embargo, la interpretación de estos métodos puede ser compleja para los no expertos y no siempre reflejan efectos perceptibles en los humanos y los ecosistemas.

Por otro lado, los métodos de punto final expresan los impactos en términos de daños a áreas específicas, como la salud humana o la biodiversidad, lo que facilita su comunicación a las partes interesadas no técnicas. No obstante, debido a las múltiples etapas de conversión de datos (que incluyen agrupación y ponderación), estos métodos pueden presentar mayor incertidumbre y perder detalles sobre las causas y los mecanismos de los impactos.

La ponderación es la conversión de los resultados de los valores normalizados o caracterizados multiplicándolos por su factor de ponderación. Con la suma de todos ellos se obtiene una puntuación única total, representando un daño ambiental y la importancia relativa de cada categoría de impacto sobre el medio ambiente. Se considera que los factores de ponderación son subjetivos, dependen del área geográfica, consideran criterios socioeconómicos, políticos, sociales, y consideran valores de expertos ambientales (Carnerero, 2019).

Las dificultades presentes en la ponderación fueron el punto de partida para el desarrollo de métodos de evaluación como el Eco-indicator 99 y ReCiPe

(Goedkoop et al., 2016). Existe una gran diversidad de métodos para evaluar el impacto del ACV. En el año 2000, se creó Eco-indicator 99, un método de enfoque de punto final. En 2002, se presentó el método CML 2001, de enfoque de punto medio, con 9 categorías de impacto. Este método evolucionó hasta convertirse en ReCiPe, que apareció en 2009, con hasta 18 categorías de impacto y combinando ambos enfoques. Otros métodos incluyen el IPCC 2013, de enfoque de punto medio; EDIP (2003), actualizado como Impact World+ (2016); y el ILCD (2012), actualizado como LC-Impact (2016), también de enfoque de punto medio, con 15 indicadores de impacto. Los métodos también se diferencian según su origen o área geográfica, siendo algunos específicos de continentes o regiones del mundo (Zanni et al., 2020).

La integración de ambos enfoques (punto medio y final) facilita tanto el análisis técnico como la comunicación a las partes interesadas no técnicas (Rashedi & Khanam, 2020). Este es el caso de ReCiPe que es actualizado regularmente para reflejar los avances científicos y mejorar la precisión y relevancia de los resultados. La versión ReCiPe 2016, por ejemplo, incluyó mejoras significativas respecto a ReCiPe 2008, ajustando los factores de caracterización y mejorando la regionalización de los datos (Dekker et al., 2020). Abarca una amplia gama de categorías de impacto ambiental, incluyendo cambio climático, acidificación, eutrofización, toxicidad humana, ecotoxicidad, y más. Esta cobertura extensa permite una evaluación integral de los impactos ambientales (Alyaseri & Zhou, 2019). ReCiPe proporciona un marco metodológico armonizado que integra diferentes aspectos del ACV, asegurando consistencia y comparabilidad en los resultados. Esto es especialmente útil para estudios comparativos y para la toma de decisiones basada en evidencias científicas sólidas (Huijbregts et al., 2020).

El método de Huella Ambiental (EF 3.1.) evalúa el uso de recursos, las emisiones de contaminantes y los residuos asociados a un conjunto bien definido de productos o actividades de una organización. Estima tanto los impactos directos como indirectos, abarcando procesos previos (producción y suministro) y posteriores (distribución, uso y fin de vida). Además, permite calcular la huella ambiental utilizando datos agregados (European Commission, 2022).

### **3.2.3.3 Programas informáticos para la modelización**

Las bases de datos y métodos de evaluación se utilizan mediante el uso de programas para modelizar los impactos de los inventarios de ACV. Se utilizan para una amplia gama de aplicaciones, desde eco-calculadoras y herramientas de

ecodiseño hasta herramientas expertas en ACV. Entre estas últimas se encuentra el programa SimaPro que es uno de los más empleados a nivel internacional para la realización de trabajos tanto de carácter comercial como de investigación (PRé Sustainability, 2023). SimaPro es particularmente eficaz debido a su amplia base de datos y la capacidad de manejar datos complejos y diversas categorías de impacto ambiental. Esto permite a los usuarios obtener resultados consistentes y detallados, que son cruciales para el análisis ambiental profundo y la mejora continua de los procesos productivos (Lopes Silva et al., 2019).

El segundo en importancia es el programa GaBi, que tiene la cualidad de integrar completamente los procesos unitarios (Sphera, 2023). GaBi tiende a ofrecer una modelización más detallada de los procesos industriales específicos, mientras que SimaPro es más versátil en términos de la variedad de métodos de impacto y bases de datos que puede integrar (Emami et al., 2019).

El siguiente en relevancia es programa openLCA, que es el único programa de ACV gratuito y de código abierto que se puede utilizar para evaluaciones profesionales del ciclo de vida (GREENDELTA, 2023). Mientras que SimaPro es un software comercial con una amplia base de datos y soporte técnico profesional, openLCA ofrece una plataforma gratuita y abierta que permite a los usuarios descargar y personalizar el software según sus necesidades específicas. Además, soporta una integración flexible con diferentes bases de datos y metodologías de evaluación de impacto, lo que lo hace versátil en la configuración de estudios de LCA (Iswara et al., 2020).

Existen más de 30 programas disponibles para diferentes actividades que se diferencian en el área objetivo de análisis, como la construcción (eToolLCD, Pleiades ACV, One Click LCA), industria (ECOSPEED Scout), empaque (PackageSmart, Instant LCA Packaging, eQopack, Trayak), manejo de residuos (LCA4Waste, PLACES), específicos de un país (eFootprint, jimuLCA), según categoría de impacto (carbmee, Carbonstop, Air.e HdC), área de sostenibilidad del ACV (SULCA, Eco-Bat, EarthSmart), o el origen de la base de datos (ecoinvent, 2022).

PestLCI es un modelo diseñado para estimar las emisiones de pesticidas al aire, agua superficial y subterránea en aplicaciones de campo, utilizado en el análisis de inventarios de ciclo de vida. La versión 2.0 mejoró las limitaciones de la versión anterior, incorporando nuevos módulos para el flujo por macroporos y efectos de la labranza, además de ampliar las bases de datos de pesticidas, meteorología y suelos para abarcar diversas zonas climáticas y perfiles de suelo europeos (Dijkman et al., 2012).

A pesar de la variedad de herramientas informáticas disponibles y de los inconvenientes de Simapro, éste es el software líder. El principal inconveniente de SimaPro es su costo y la complejidad de uso. Al ser un software comercial, requiere una inversión significativa tanto en términos de licencias como de tiempo para capacitación y adaptación a las necesidades específicas de los usuarios. Sin embargo, su gran potencial y su capacidad para realizar evaluaciones detalladas utilizando diferentes métodos de evaluación del impacto del ciclo de vida, lo hace adecuado para una gama más amplia de aplicaciones y estudios comparativos (Lopes Silva et al., 2019).

### 3.2.4 Interpretación

El objetivo es asegurar que los resultados del ACV sean coherentes, completos y útiles para la toma de decisiones. Los objetivos principales de cada etapa son:

1) Identificación de Cuestiones Significativas, esta etapa implica identificar los puntos críticos y los flujos que contribuyen de manera significativa a los impactos ambientales, basándose en los resultados de las fases de inventario y evaluación de impacto (Laurent et al., 2020).

2) Evaluación de la Completitud, Sensibilidad y Consistencia, que consiste en verificar que todos los datos necesarios están incluidos y que los resultados son robustos frente a las variaciones en los datos y las metodologías. Para ello se realiza un chequeo de completitud, para verificar que todos los elementos relevantes del ciclo de vida han sido considerados y que no hay omisiones significativas. Chequeo de sensibilidad, para evaluar cómo las variaciones en los parámetros de entrada afectan los resultados del ACV para identificar los factores más influyentes. Chequeo de consistencia, que consiste en revisar la coherencia en la metodología utilizada y asegurar que se han aplicado de manera uniforme a lo largo del estudio (Sala et al., 2020).

3) Provisión de Conclusiones, Limitaciones y Recomendaciones, es decir, desarrollar conclusiones basadas en los resultados del ACV y ofrecer recomendaciones prácticas para la mejora ambiental del producto o proceso evaluado.

El marco general propuesto en la Figura 3.25. para realizar la interpretación del ciclo de vida, indica los cinco pasos principales que se destacan en recuadros de color gris claro; los métodos y procedimientos propuestos que se resumen en recuadros de color gris oscuro. Los métodos y procedimientos en texto azul y en

negrita se consideran parte de los requisitos mínimos para la realización de la interpretación.

La flecha punteada negra indica la provisión de entradas/información desde la fase de definición del objetivo y alcance hacia el proceso de interpretación. La naturaleza iterativa de la fase de interpretación con otras fases se destaca con las flechas discontinuas de color rojo oscuro (Laurent et al., 2020).

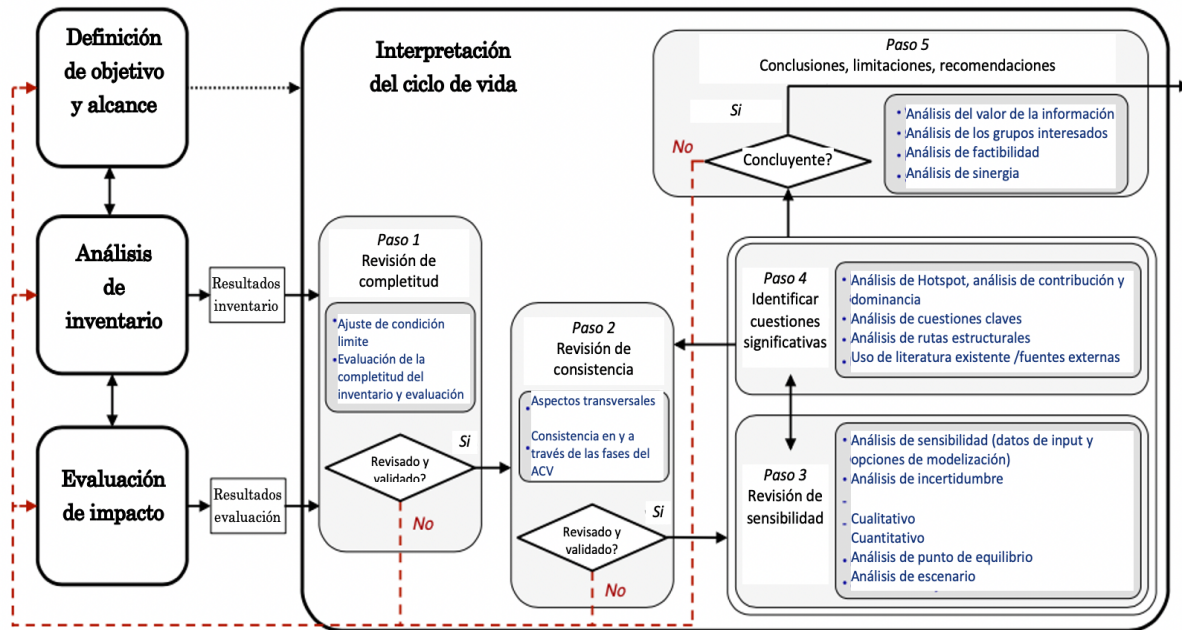


Figura 3.25. Relaciones entre los elementos de la fase de interpretación con las demás fases del ACV (adaptado de Laurent et al., 2020)

La fase de interpretación permite realizar una toma de decisiones informada, proporciona la base para decisiones bien fundamentadas que pueden mejorar la sostenibilidad y reducir los impactos ambientales, asegura que los resultados del ACV se presenten de manera clara y transparente, facilitando su comprensión por parte de todas las partes interesadas, y ayuda a identificar las áreas donde se pueden realizar mejoras significativas en el desempeño ambiental.

### 3.2.5 Aplicación del ACV ambiental en la producción de fruta de hueso

La revisión bibliográfica realizada bajo la búsqueda de las palabras clave "life cycle assessment (LCA) stone fruit ; apricot ; nectarine ; peach" en WOS y SCOPUS permitió identificar 11 artículos relevantes específicos en la producción de fruta de hueso, que se presentan en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Revisión bibliográfica de ACV ambiental en sistemas de producción de fruta de hueso. Unidad funcional 1 kg de fruta

N.º	Referencia	Alcance	Programa - Método - base de datos	N.º de indicadores	kg CO <sub>2</sub> eq	País
1	(Ingrao et al., 2015)	<i>“Cradle to gate”</i>	SimaPro - IMPACT2002+ - ecoinvent	4 (energía no renovable, ocupación del suelo, calentamiento global y respiración inorgánica).	0.22	Italia
2	(Vinyes et al., 2015)	<i>“Cradle to gate”</i>	SimaPro - ReCiPe - ecoinvent	13 (Cambio climático, Agotamiento del ozono, Acidificación terrestre, Eutrofización del agua dulce, Agotamiento del agua y 8 más).	0.16	España
3	(Vinyes et al., 2017)	<i>“Cradle to grave”</i>	SimaPro - ReCiPe - ecoinvent	14 (Cambio climático, agotamiento del ozono, formación fotoquímica de oxidantes, acidificación terrestre, eutrofización del agua dulce, eutrofización marina, y 8 más).	0.38	España
4	(Frankowska et al., 2019)	<i>“Cradle to grave”</i>	GaBi - ReCiPe - ecoinvent	8 (Agotamiento fósil, Eutrofización de agua dulce, Potencial de calentamiento global, Agotamiento del ozono y 4 más).	2	Reino unido
5	(Martin-Gorriz et al., 2020)	<i>“Cradle to gate”</i>	SimaPro - CML 2001 - ecoinvent	6 (Elementos de agotamiento abiótico, combustibles fósiles de agotamiento abiótico, potencial de acidificación, potencial de eutrofización, potencial de calentamiento global y uso del agua).	0.38	España
6	(Fiore et al., 2018)	<i>“Cradle to grave”</i>	SimaPro - IPCC 2013 - ecoinvent / agrifootprint	3 (Emisiones de gases efecto invernadero, Eliminación de CO <sub>2</sub> atmosférico y potencial neto de calentamiento global).	0.29	Italia
7	(Bartl et al., 2012)	<i>“Cradle to gate”</i>	SimaPro - ReCiPe - ecoinvent	5 (Potencial de cambio climático, eutrofización de agua dulce, eutrofización terrestre, acidificación y toxicidad humana por actividades agrícolas).	0.59	Perú
8	(Basset-Mens et al., 2016)	<i>“Cradle to farm gate”</i>	SimaPro - ReCiPe y CML 2001 - agribalyse	8 (Cambio climático, toxicidad humana, acidificación terrestre, eutrofización del agua dulce, eutrofización marina, ecotoxicidad)	0.17	Francia

N.º	Referencia	Alcance	Programa - Método - base de datos	N.º de indicadores	kg CO <sub>2</sub> eq	País
				terrestre, ecotoxicidad del agua dulce y energía no renovable).		
9	(Pergola et al., 2017)	<i>“Cradle to grave”</i>	SimaPro - CML 2001 - ecoinvent	10 (Agotamiento abiótico, cambio climático, oxidación fotoquímica, agotamiento de la capa de ozono, toxicidad humana, eutrofización y 4 más).	0.34	Italia
10	(de Menna et al., 2015)	<i>“Cradle to farm gate”</i>	SimaPro - IMPACT2002+ - ecoinvent	12 (Agotamiento de la capa de ozono, ecotoxicidad acuática, ecotoxicidad terrestre, ocupación del suelo, calentamiento global, energía no renovable, extracción de minerales y 5 más).	0.27	Italia
11	(Pergola et al., 2022)	<i>“Cradle to farm gate”</i>	SimaPro - IPCC - ecoinvent	6 (Eutrofización, acidificación, agotamiento de la capa de ozono, oxidación fotoquímica y 2 más).	0.12	Italia

Debido al importante valor comercial y la necesidad de mejorar la sostenibilidad de la producción de frutas de hueso, diferentes estudios han cuantificado los impactos ambientales de los sistemas productivos. Los autores principalmente seleccionaron con un 64% "cradle to gate" como alcance del estudio. El 36% utilizó "cradle to grave". La tendencia hacia el enfoque "cradle to gate" en la mayoría de los estudios, destaca la necesidad de comprender los impactos desde la fase de producción hasta el punto de venta.

El indicador de huella de carbono se destaca como el más utilizado, debido a que es un indicador más reconocido y entrega una primera visión de los impactos ambientales asociados con la producción de fruta de hueso. El promedio de este indicador en los estudios analizados es de 0.50 kg CO<sub>2</sub> eq por unidad funcional. El Reino Unido como país importador presenta los niveles más altos con 2 kg CO<sub>2</sub> eq por kg de fruta de hueso (unidad funcional) con un alcance "cradle to grave". España como país productor presentan las menores emisiones por unidad funcional con 0.16 kg CO<sub>2</sub> eq, considerando el alcance "cradle to gate". Estos resultados resaltan diferencias significativas entre países productores y consumidores, y recalcan la importancia de considerar las condiciones locales al evaluar los impactos de la producción de alimentos.

En relación al programa informático utilizado, el 90% utiliza SimaPro y el 10% el programa GABI. Respecto al método de evaluación, el 50% utilizó ReCiPe, el 30% CML y el 20% IMPACT2002+. Finalmente, sobre la base de datos seleccionada, el 80% empleó ecoinvent, y el 10% agrifootprint y agribalyse.

Las categorías más analizadas son el calentamiento global, la acidificación, el agotamiento abiótico y la eutrofización. Algunos estudios, como el de Vinyes et al. (2017), evalúan un mayor número de indicadores (14 en total), mientras que otros, como el de Fiore et al. (2018), se enfocan en menos indicadores (3), siendo el promedio de 8 indicadores por estudio.

El estudio más relevante en términos de alcance y completitud del inventario es el de Vinyes et al. (2017), que analiza el ciclo de vida del cultivo del melocotón en España. Este trabajo cubre el análisis "de la cuna a la tumba", proporcionando un inventario detallado de todas las etapas del ciclo, incluyendo las pérdidas de fruta en las etapas de producción, comercio y consumo. Además, destaca por la cantidad de categorías de impacto que evalúa en la fase agrícola, comercio, consumo y fin de vida, lo que lo convierte en un análisis muy completo. El estudio más reciente en el área es el de Pergola et al. (2022).

En conclusión, los estudios revisados abarcan una diversidad de alcances y metodologías aplicadas en la producción agrícola en diversos países. Sin embargo, se identifica una falta de investigaciones recientes que utilicen el ACV ambiental en la producción de frutas de hueso, particularmente en contextos que consideren estándares actualizados de sostenibilidad ambiental y avances tecnológicos. Se requiere de nuevas investigaciones que exploren los beneficios potenciales de la implementación de tecnologías emergentes en las prácticas agrícolas contemporáneas.

### **3.3 Metodología de análisis de costes de ciclo de vida**

El Análisis de Costes de Ciclo de Vida (CCV) es una metodología que evalúa todos los costos asociados con el ciclo de vida de un producto, proceso o servicio. Este análisis abarca desde los costos iniciales de adquisición y construcción, hasta los costos operativos, de mantenimiento y disposición final. El análisis CCV se utiliza para proporcionar una visión integral y de largo plazo de los costos, permitiendo así una toma de decisiones informada y basada en la optimización económica (Hunkeler et al., 2008).

EL análisis CCV es la metodología más antigua de las tres áreas de la sostenibilidad. Tiene sus raíces en prácticas desarrolladas en los Estados Unidos

en la década de 1930, cuando la Oficina General de Contabilidad comenzó a incluir los costos de operación y mantenimiento al adquirir tractores, reconociendo que los costos de adquisición eran solo una parte de los costos totales asociados con el ciclo de vida del producto (Hunkeler et al., 2008). Desde entonces, ha evolucionado para convertirse en una metodología esencial en la toma de decisiones tanto en el sector público como en el privado.

A medida que las preocupaciones por el desarrollo sostenible y el pensamiento sobre el ciclo de vida comenzaron a tomar relevancia, el análisis CCV también se expandió para abordar no solo los costos internos, sino también los costos externos que abarcan el área ambiental y social (Hunkeler et al., 2008).

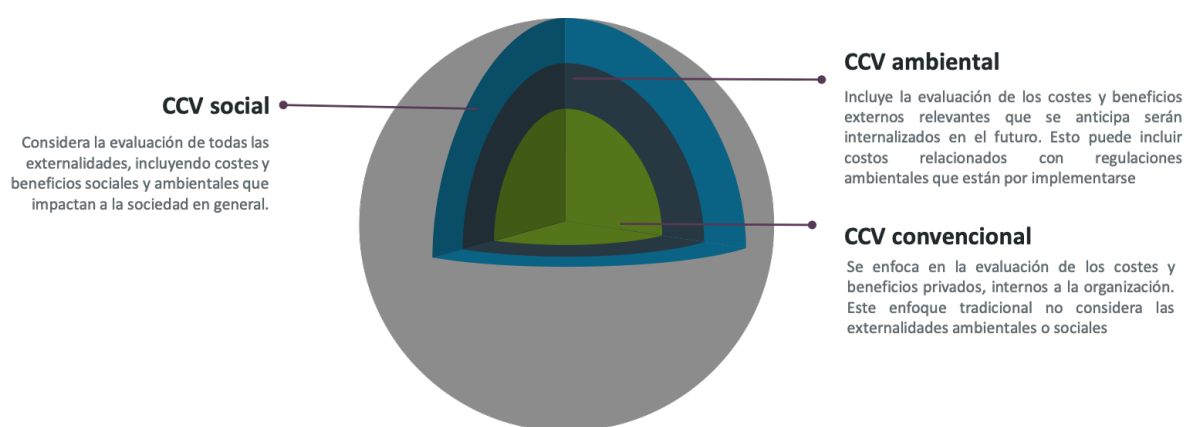
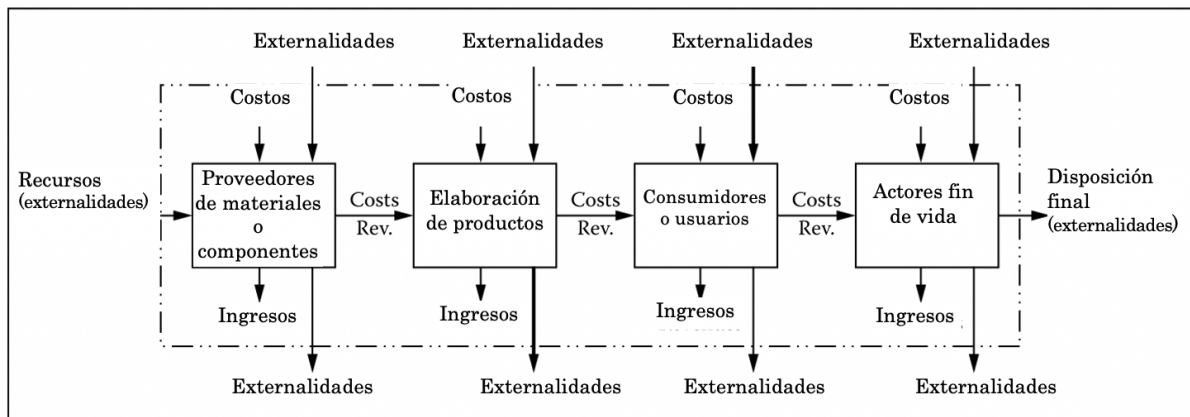


Figura 3.26. Tipos de análisis de costes de ciclo de vida y sus alcances (adaptado de UNEP, 2011)

En la Figura 3.26. se presentan los tres enfoques junto con sus alcances:

- 1) El Coste del Ciclo de Vida convencional se centra en la evaluación de los costos y beneficios privados, internos a la organización. Este enfoque calcula todos los costos asociados con un producto o proceso a lo largo de su vida útil, descontándolos al valor presente mediante una tasa de descuento. Dicha tasa refleja el interés del mercado ajustada por la inflación o el costo del capital propio de la organización. Este método permite convertir los costos y beneficios futuros en su valor presente, asegurando que la evaluación sea realista y esté alineada con las expectativas económicas presentes. La tasa de descuento varía según el tipo de análisis y el objetivo. En el estudio de Fregonara & Ferrando 2023 discuten la importancia de la tasa de descuento en la evaluación de la sostenibilidad económica y ambiental de proyectos, subrayando cómo diferentes modalidades de descuento pueden influir significativamente en los resultados del análisis.
- 2) El Coste del Ciclo de Vida Ambiental (CCV Ambiental) amplía el análisis de costos tradicionales al incluir tanto los costos internos como aquellos costos y

beneficios externos que se prevé serán internalizados en el futuro, como los derivados de futuras regulaciones ambientales. Utiliza límites de sistema y unidades funcionales similares a las del ACV (ver Figura 3.27.), abarcando todas las etapas del ciclo de vida del producto y considerando todos los actores económicos, desde los proveedores de materiales hasta los responsables del fin de vida útil (Rebitzer & Hunkeler, 2003).



Sistema económico = Límites del CCV
  Sistema natural y social: Límites del análisis social y ambiental

Figura 3.27. Marco conceptual del CCV ambiental (adaptado de Rebitzer & Hunkeler, 2003)

El CCV Ambiental incorpora los costos de extracción de recursos, producción, uso, disposición final del producto y sus externalidades, como emisiones, residuos y contaminación. A diferencia de otros enfoques, evita la doble contabilización de impactos ambientales y no convierte unidades ambientales a monetarias. Los resultados combinan los costos del ciclo de vida con los impactos ambientales, presentándolos en términos equivalentes, como  $1 \text{ U.F.} = x \text{ kg CO}_2 \text{ eq} = x \text{ €}$  (Rebitzer & Hunkeler, 2003).

3) El CCV social es el enfoque más amplio para la evaluación de costos, ya que incluye todas las externalidades, tanto sociales como ambientales, que afectan a la sociedad en general. Este enfoque proporciona una evaluación integral de la sostenibilidad, abarcando una amplia gama de costos y beneficios que no son asumidos directamente por las partes involucradas en la transacción económica (UNEP, 2011).

A diferencia del CCV convencional o ambiental, el CCV social incluye un grupo más amplio de partes interesadas, como gobiernos y otros organismos públicos que no están directamente relacionados con el ciclo de vida del producto. Este enfoque utiliza una tasa de descuento social para las externalidades, que

refleja las preferencias sociales sobre el costo de los impactos ambientales y sociales a lo largo del tiempo. A diferencia de las tasas de descuento financieras, que se aplican a los costos privados, la tasa de descuento social se centra en cómo la sociedad valora los costos y beneficios futuros asociados con estos impactos.

La tasa de descuento social es clave para integrar adecuadamente los costos ambientales en proyectos públicos, con tasas más bajas indicando una mayor preocupación por el bienestar futuro (Fregonara & Ferrando, 2023). La tasa debe considerar la incertidumbre y riesgos asociados con impactos ambientales y sociales futuros, justificando tasas más bajas en caso de alta incertidumbre. Según O'mahony 2021, esta elección es esencial para garantizar la justicia intergeneracional y la sostenibilidad a largo plazo, lo que podría requerir reducir las tasas actuales. Las tasas de descuento social varían entre países, reflejando diferencias en políticas públicas y prioridades: Reino Unido y Alemania aplican una tasa del 3,5%, Canadá un 10%, India un 12% y Filipinas un 15% (Rosegrant et al., 2023).

### **3.3.1 Metodología de costes de ciclo de vida convencional**

El marco general para el desarrollo de la metodología de CCV, se basa en las normas ISO 14040-14044:2006 de ACV, y se representa en las siguientes etapas.

#### **3.3.1.1 Definición de objetivo y alcance**

En la primera etapa, se requiere definir el objetivo del estudio, la unidad funcional, los límites o el alcance del sistema, el enfoque, las tasas de descuento, entre otros aspectos relevantes. De igual forma se debe presentar la perspectiva del producto en función de su relación con el proveedor, fabricante, usuario o consumidor. Asimismo, se debe desarrollar una estructura de desglose de costos para asegurar una recopilación consistente de datos a lo largo de todo el ciclo de vida (UNEP, 2011).

#### **3.3.1.2 Análisis de inventario**

En esta etapa, se reúnen todos los datos técnicos, económicos y financieros necesarios para evaluar los costos del ciclo de vida. Los flujos de referencia deben definirse de acuerdo con la unidad funcional, la cual debe coincidir con el ACV cuando se analicen conjuntamente o dentro de un análisis de sostenibilidad. La elaboración del inventario se basa en la recopilación de información asociada a procesos unitarios, con niveles de agregación variables dependiendo de la

información disponible y la naturaleza del análisis. La selección de los costos generales para el inventario del CCV pueden variar considerablemente, por ello, es recomendado obtener información específica para el producto o sistema en estudio en lugar de utilizar datos promedio del mercado (Yang et al., 2019).

### 3.3.1.3 Evaluación de impacto

En esta sección se analiza los datos recopilados en la fase anterior, siendo la primera etapa la clasificación de los costos en las categorías que fueron definidas anteriormente, seguido de la aplicación de la tasa de descuento (si corresponde) y finalmente la agregación de los resultados por obtener el análisis CCV del sistema en análisis. Estos resultados pueden ser analizados mediante distintos indicadores y métodos. Algunos de ellos son:

- Tiempo de recuperación de la inversión (Pay-back), define el período necesario para recuperar los costos de inversión iniciales. Es un método sencillo y útil para los inversores, especialmente cuando se combinan con otros modelos para evaluar efectos a largo plazo. Sus desventajas es que no considera el valor del tiempo (a menos que se utilice el análisis de período de recuperación descontado), y no determina el costo total del ciclo de vida, ya que el resultado es un período de tiempo (Moins et al., 2020).
- Análisis Costo-Beneficio (ACB), es un método fácil de usar y comprender, pero a menudo se limita a una parte específica del ciclo de vida, como el costo de producción, y no determina el CCV completo (Moins et al., 2020).
- Valor actual neto (VAN), presenta el CCV total en un valor único, lo que facilita la comparación entre diferentes alternativas. Considera el valor del tiempo, permitiendo una evaluación precisa de los flujos de efectivo futuros descontados al presente. Su principal inconveniente es que las alternativas deben tener el mismo período de análisis para que sus VAN puedan ser comparados adecuadamente. Requiere un análisis profundo para comparar las etapas individuales del ciclo de vida (Moins et al., 2020).
- Valor añadido acumulado: El concepto de Valor Añadido se aplica a un proceso de producción cuando los costos incurridos son menores que el precio que se puede obtener al vender el producto o servicio creado, lo que indica que el proceso está generando valor. El valor añadido de un proceso se define como la diferencia entre los costos incurridos y el precio obtenido por la venta del producto o servicio (Ciroth, 2016). Esta metodología se utiliza tradicionalmente para apoyar decisiones de inversión (Heijungs et al., 2013).

En ciclos de vida donde se evalúa un proyecto de inversión, puede ser ventajoso representar los resultados mediante el uso de herramientas para evaluar alternativas de inversión, debido a que proporcionan información sobre la rentabilidad del sistema. En ciclos de vida que involucran varios agentes de la cadena de valor, puede ser relevante representar los resultados mediante el valor añadido acumulado del sistema (Ciroth, 2016).

#### **3.3.1.4 Interpretación de resultados**

En esta fase, se identifican las etapas del proceso que generan los mayores costos, con el objetivo de optimizar operaciones. Asimismo, se establecen las decisiones metodológicas clave, como la definición de los productos analizados, que pueden influir en los resultados finales. Para evaluar la robustez de estos resultados, se realizan análisis de sensibilidad, los cuales permiten determinar el impacto de variaciones en los datos de entrada. Estos análisis son fundamentales para respaldar las conclusiones y formular recomendaciones sólidas (Hunkeler et al., 2008).

#### **3.3.2 Aplicación del análisis CCV a la producción de agroalimentaria**

A continuación se presenta la revisión bibliográfica realizada bajo la búsqueda de "life cycle cost (LCC) Analysis ; fruit ; apricot ; nectarine ; peach" en WOS y SCOPUS, que permitió identificar los 10 artículos más relevantes en revistas científicas de los últimos años en el sector agroindustrial (ver Tabla 3.8.).

En los artículos revisados sobre diversos temas dentro del sector agroalimentario, el 70% de los autores seleccionó un alcance "desde la cuna hasta la puerta" ("*cradle to gate*"), mientras que el 30% utilizó un enfoque "desde la cuna a la tumba" ("*cradle to grave*"). Los estudios se enfocan principalmente en las etapas de producción y en los impactos asociados netamente con la actividad agrícola desde la cuna hasta la puerta del lugar de elaboración del producto, excluyendo los impactos posteriores como transporte, mercado mayorista y minorista, y la disposición final.

Tabla 3.8. Revisión bibliográfica de análisis de costes de ciclo de vida en el sector agroindustrial

N.º	Referencia	Alcance	Tema	N.º indicadores	País
1	(Bosona et al., 2019)	<i>“Gate to gate”</i>	Iniciativas agrícolas para la conversión de restos de poda en biomasa y en energía.	3 (Costos, ingresos y beneficio neto).	Alemania, España e Italia
2	(Iofrida et al., 2020)	<i>“Cradle to farm gate“</i>	Cultivo del olivo ecológico y convencional.	2 (Valor actual neto y tasa interna de rendimiento).	Italia
3	(Tamburini et al., 2015)	<i>“Cradle to farm gate“</i>	Producciones agrícolas en el área mediterránea.	7 (Coste de: manejos agrícolas, insumos, transporte, otros recursos, gastos generales y externalidades del uso de fertilizantes y pesticidas).	Italia
4	(Cacace et al., 2020)	<i>“Gate to gate”</i>	Procesamiento de alimentos a alta presión.	5 (Inversión inicial, coste operativo, coste de mantenimiento, valor residual y coste total).	Italia
5	(Casamayor et al., 2024)	<i>“Cradle to gate”</i>	Sistemas hidropónicos	3 (Costo de compra, costo de operación y costo de mantención).	Reino Unido
6	(Blanc et al., 2019)	<i>“Cradle to grave”</i>	Plásticos de origen biológico en la cadena de suministro de frutas.	5 (Coste de: maquinaria, mano de obra, materiales y servicios, y otros gastos).	Italia
7	(Canaj et al., 2021)	<i>“Cradle to farm gate”</i>	Producción de frutas y hortalizas regadas con agua regenerada	3 (Costo interno, costos ambientales externos y costo total).	Italia
8	(Cavalett et al., 2012)	<i>“Cradle to gate”</i>	Biorrefinerías de caña de azúcar	1 (Costo de inversión).	Brasil

N.º	Referencia	Alcance	Tema	N.º indicadores	País
9	(Albrecht et al., 2013)	"Cradle to grave"	Sistemas de embalaje para el transporte de frutas y verduras	3 (Costes de producción, transporte y distribución).	Francia, Alemania, Países Bajos y Reino unido
10	(Willersinn et al., 2017)	"Cradle to grave"	Reducción de la pérdidas de alimento en el ciclo de la patata	6 (Beneficio neto, costo total de producción, variabilidad del ingreso, pérdida de rendimiento, capital invertido y retorno de la inversión).	Suiza

En relación con los indicadores, los estudios presentaron en promedio 4 indicadores, con un máximo de 7 y un mínimo de 1. Los indicadores más utilizados fueron la inversión inicial, el costo total y el beneficio neto (60%), lo que refleja un enfoque integral que considera tanto los costos como los beneficios económicos asociados con las actividades agrícolas. En el 20% de los casos se consideraron los costos de las externalidades y, en el otro 20% los costos de producción. El método más utilizado fue el de costos de valor añadido acumulado (60%), seguido de la metodología de costo-beneficio (40%).

Los estudios analizados destacan la importancia de implementar tecnologías avanzadas, técnicas de optimización y enfoques integrados para mejorar la sostenibilidad en sectores clave como la agricultura y la industria alimentaria. Se identifican amplias oportunidades para optimizar la gestión de recursos agrícolas a corto plazo y mitigar los impactos ambientales no reflejados en los precios de mercado, beneficiando tanto a agricultores como a comunidades rurales. Además, se demuestra que la flexibilidad en los sistemas productivos, como en la producción de caña de azúcar, maximiza beneficios económicos y operativos. En el caso de la reutilización de aguas residuales para riego, un enfoque multimétrico resalta el equilibrio entre desempeño económico y ambiental, subrayando la necesidad de considerar externalidades sociales y nuevos métodos de monetización.

En cuanto a los temas de investigación, se evidencia una ausencia de análisis de costos internos y externos en el área de la producción de frutas, específicamente de frutas de hueso, que contemple la implementación de tecnologías de AP y AD para optimizar los costos operativos y el impacto económico de la actividad.

### 3.4 Metodología de ACV social

Los debates sobre la inclusión de los criterios sociales y socioeconómicos en la evaluación de productos a través del ciclo de vida surgieron en la década de 1980. Las primeras iniciativas proceden del Grupo de proyectos de economía ecológica en Alemania en 1987 (Öko-Institut, 1987), y del informe del taller de SETAC en 1993 (SETAC, 1993), que buscaban integrar aspectos sociales junto con la evaluación ambiental de los productos.

En el año 2009 (versionado en 2020), la Iniciativa del Ciclo de Vida del PNUMA/SETAC presenta “las Directrices para la Evaluación del Ciclo de Vida Social de los Productos” (Benoît et al., 2020; UNEP, 2009). Estas directrices abordan aspectos que afectan directa o indirectamente a las partes interesadas, siendo desarrolladas con la participación activa de expertos en responsabilidad social, sostenibilidad y evaluación del ciclo de vida. Adicionalmente a estas directrices, Benoit-Norris, (2011 y 2013) y Traverso et al., (2021) publicaron las fichas metodológicas para brindar orientación práctica para realizar estudios de casos de análisis del ciclo de vida social (ACV-S).

El ACV-S es una metodología utilizada para evaluar los impactos sociales y socioeconómicos asociados con el ciclo de vida de un producto o servicio. Este enfoque se centra en los efectos tanto positivos como negativos que las actividades relacionadas con un producto tienen sobre las diferentes partes interesadas a lo largo de su ciclo de vida (UNEP, 2009). El análisis considera tanto impactos directos como indirectos relacionados con el comportamiento empresarial, con procesos sociométricos (relaciones sociales y las interacciones entre los diferentes actores involucrados en el ciclo de vida de un producto o servicio) y con la acumulación de capital social (Yang et al., 2019).

El ACV-S realiza una evaluación integral al evaluar los impactos sociales en todas las fases del ciclo de vida del producto, incluyendo la planificación, producción, uso y disposición final (Iofrida et al., 2018). Es una metodología enfocada en las partes interesadas al identificar y analizar los efectos sobre trabajadores, comunidades locales, consumidores y la sociedad en general (Cadena et al., 2019). Considera tanto los impactos negativos, como las condiciones laborales deficientes, y los positivos, como la generación de empleo y la mejora de la calidad de vida (Ramos Huarachi et al., 2020).

Entre las ventajas del ACV-S se pueden identificar aspectos como que 1) ayuda a las organizaciones a identificar y mitigar los impactos sociales negativos, promoviendo prácticas más sostenibles y socialmente responsables (Traverso,

2018); 2) apoya a las empresas en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU (Zamagni et al., 2021); 3) proporciona información valiosa para la toma de decisiones y que puede ser utilizada para mejorar las políticas y estrategias empresariales, enfocándose en la mejora continua de las condiciones sociales (Benoît et al., 2020).

El ACV social evalúa los impactos sociales de productos o servicios a lo largo de su ciclo de vida de forma general o específica (ver Figura 3.28.). El ACV-S General ofrece una visión panorámica, identificando tendencias y desafíos comunes en un sector (como la industria textil o la electrónica), mientras que el ACV-S Específico se centra en un producto o servicio concreto (un modelo de smartphone, por ejemplo), evaluando sus impactos sociales únicos. El primero sirve para establecer políticas y comparar sectores, mediante el análisis como del riesgo social utilizando datos provenientes de bases de datos genéricas a partir de inventarios económicos del producto (ver Figura 3.29.), mientras que el segundo es útil para tomar decisiones de diseño, producción y comercialización más sostenibles, requieren de la recopilación de datos de inventario específicos de las organizaciones que participan en la cadena de valor. Ambos enfoques, genérico y específico, son complementarios y proporcionan información valiosa para mejorar el desempeño social de productos y empresas.

Las directrices de UNEP-SETAC 2009, proponen que el ACV-S se fundamente en el marco de las normas ISO 14040; 14044: 2006, siguiendo algunas adaptaciones en el contenido y aplicación. Al igual que las anteriores áreas de la sostenibilidad descritas, la metodología se desarrolla en cuatro fases, a continuación, se explican algunos aspectos diferenciadores del ACV-S y se omiten los aspectos que son comunes al ACV-S.

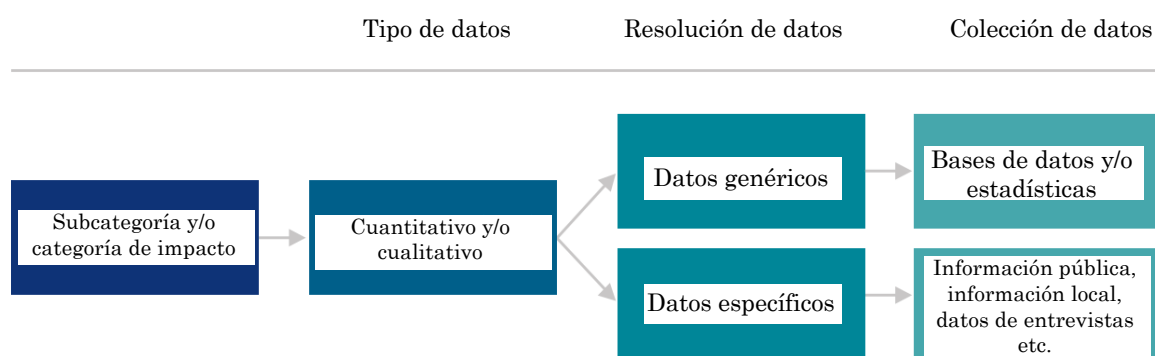


Figura 3.28. Recolección de datos e interrelaciones en ACV-social (adaptado de UNEP-SETAC, 2009)

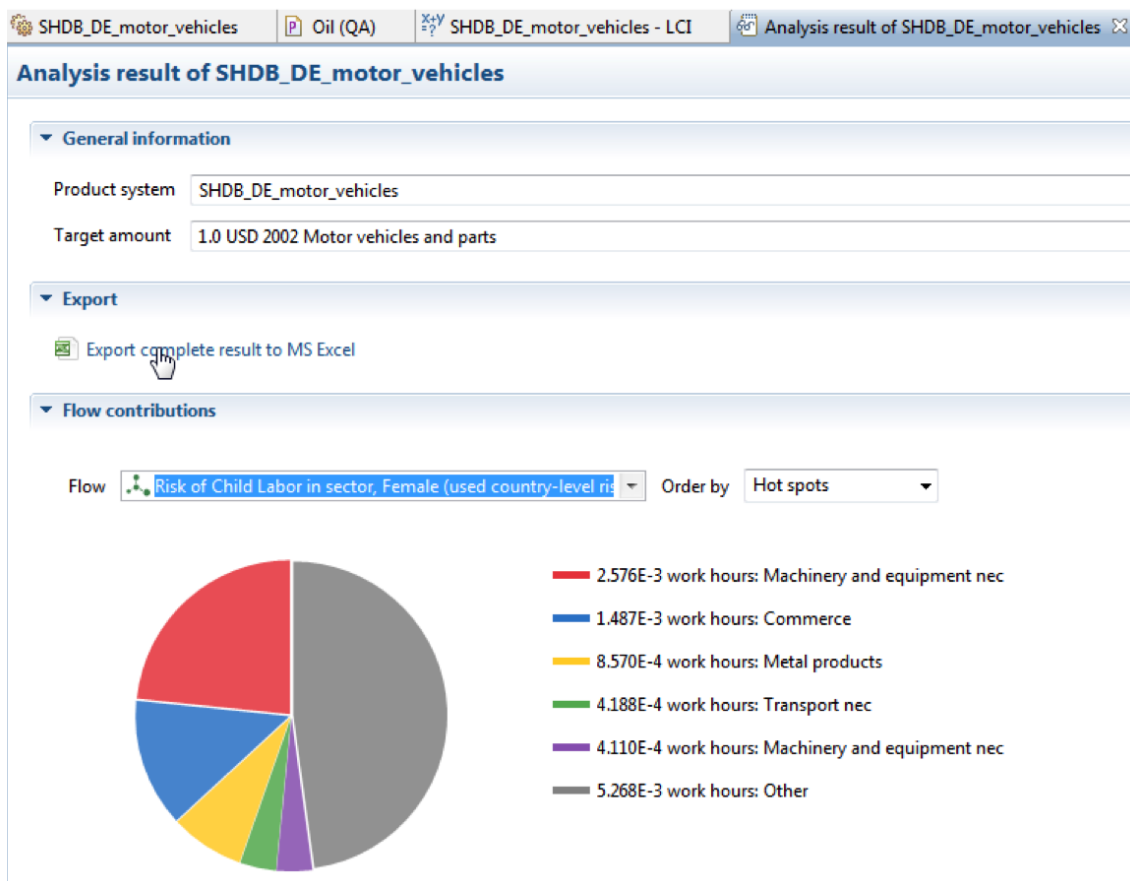


Figura 3.29. Enfoque genérico indicando la contribución en horas de riesgo de trabajo infantil detallado por procesos en la producción de motores de vehículos y sus partes, utilizando información de base datos (Ciroth et al., 2013)

### 3.4.1 Definición de objetivo y alcance

La etapa de definición de objetivos y alcance es fundamental tanto en el ACV-A como en el ACV-S. Sin embargo, existen diferencias significativas entre ambos enfoques debido a sus distintos objetivos y contextos de aplicación.

Según Benoît et al. (2020), lo primero es decidir si el análisis se realizará sobre un producto específico o sobre una organización en su conjunto, en segundo lugar, hay que concretar específicamente qué producto u organización será objeto del análisis. En tercer lugar, se define la meta y alcance, p. ej., desde la cuna hasta la puerta o el diseño del producto. A partir de este punto hay que decidir cuál de los dos enfoques principales para evaluar los impactos sociales se va a utilizar, específico o genérico (ver Figura 3.30.).



Figura 3.30. Desarrollo de la etapa de objetivo y alcance en un ACV social (adaptado de Benoît et al., 2020)

El enfoque genérico o también conocido como escala de referencia se basa en puntos de referencia de rendimiento y comportamientos corporativos, evaluando el desempeño social relativo a estándares o normas establecidas. Es un enfoque que se caracteriza principalmente por utilizar indicadores de rendimiento social predefinidos que se comparan contra puntos de referencia, para evaluar cómo se comporta un producto o proceso en comparación con estándares de la industria o normas internacionales, y para combinar datos cuantitativos con evaluaciones cualitativas de prácticas y políticas corporativas (UNEP, 2021).

Sus principales ventajas son la simplicidad del método que es más sencillo de aplicar y entender, especialmente por la comparación directa con estándares conocidos, y su utilidad en la toma de decisiones, facilitando la identificación de áreas de mejora al compararse con normas aceptadas. Los principales inconvenientes son que tiene limitaciones en la profundidad del análisis, puede no capturar completamente la complejidad de las interacciones sociales y sus impactos, y la dependencia de normas establecidas hace que la calidad del análisis dependa de la relevancia y actualización de los puntos de referencia utilizados (Russo et al., 2016).

El enfoque específico o también conocido como de ruta de impacto se basa en cadenas de causa y efecto para analizar cómo las actividades dentro del ciclo de

vida de un producto generan impactos sociales específicos. Sus características principales son que identifica y modela las relaciones de causa y efecto entre las actividades y sus impactos sociales, utiliza modelos de caracterización para traducir datos de inventario en impactos sociales específicos y requiere datos detallados sobre las condiciones sociales y las interacciones específicas (UNEP, 2021).

Sus principales ventajas son la precisión, ofrece una evaluación más detallada y precisa de los impactos sociales al considerar las cadenas de causa y efecto, y flexibilidad, permite la inclusión de diversas variables y métodos cualitativos para un análisis más integral. Los inconvenientes se deben a que es un método más complejo y laborioso, requiriendo datos detallados y modelos robustos, de forma que la recopilación de datos específicos puede ser un desafío significativo (Sureau et al., 2020).

Tanto en el enfoque de escala de referencia (genérico) como en el enfoque de ruta de impacto (específico) hay que identificar a las partes interesadas, y definir las categorías de impacto relevantes (ver Tabla 3.9.), aunque es el enfoque de escala de referencia normalmente el que más se centra en las subcategorías de impacto y los grupos de partes interesadas. Las partes interesadas principales son 1) trabajadores que incluye todas las personas empleadas en las diversas etapas del ciclo de vida del producto; 2) comunidad local, personas y grupos que viven en las áreas afectadas por las actividades del ciclo de vida del producto; 3) sociedad, que engloba a la población general que se ve afectada por los impactos más amplios del ciclo de vida del producto; 4) consumidores, personas que usan el producto o servicio final; y 5) actores de la cadena de valor que incluye a todos los participantes en la cadena de suministro, excluyendo a los consumidores finales (Benoît-Norris et al., 2011).

Por otro lado, las categorías de impacto que se suelen considerar son 1) derechos humanos, que se centran en la protección de los derechos fundamentales de las personas; 2) condiciones laborales, que evalúa las condiciones de trabajo, incluyendo la seguridad y el bienestar de los trabajadores; 3) salud y seguridad, que considera los impactos en la salud y la seguridad de las partes interesadas; 4) patrimonio cultural, que examina cómo las actividades del ciclo de vida afectan el patrimonio cultural; 5) gobernanza que analiza las prácticas de gobernanza y cómo afectan a la transparencia y la responsabilidad; y 6) repercusiones socioeconómicas que se refiere a los impactos económicos y sociales más amplios (UNEP, 2021).

Tabla 3.9. Lista de categorías de partes interesadas y subcategorías de impacto (Benoît et al., 2020)

Categorías de partes interesadas					
Trabajador	Comunidad local	Actores de la cadena de valor (sin incluir consumidores)	Consumidor	Sociedad	Niños
Subcategorías de impacto					
1. Libertad de asociación y negociación colectiva	1. Acceso a recursos materiales	1. Competencia justa	1. Salud y seguridad	1. Compromisos públicos con temas de sostenibilidad	1. Educación proporcionada en la comunidad local
2. Trabajo infantil	2. Acceso a recursos inmateriales	2. Promoción de la responsabilidad social	2. Mecanismos de retro-alimentación	2. Contribución al desarrollo económico	2. Impactos en los niños como consumidores
3. Salario justo	3. Deslocalización y migración	3. Relaciones con los proveedores	3. Privacidad del consumidor	3. Prevención y mitigación de conflictos armados	3. Preocupaciones infantiles sobre las prácticas de marketing
4. Trabajo forzado	4. Patrimonio cultural	4. Respeto a los derechos de propiedad intelectual	4. Transparencia	4. Corrupción	
5. Igualdad de oportunidades / no discriminación	5. Condiciones de vida seguras y saludables	5. Distribución de la riqueza	5. Responsabilidad al final de la vida del producto	5. Desarrollo tecnológico	
6. Salud y seguridad	6. Respeto a los derechos indígenas			6. Tratamiento ético de los animales	
7. Beneficios sociales / seguridad social	7. Compromiso comunitario			7. Alivio de la pobreza	
8. Relaciones laborales	8. Empleo local				
9. Empleo y relaciones laborales	9. Condiciones de vida seguras				
10. Acoso sexual					
11. Pequeños agricultores incluidos agricultores familiares					

Cada una de estas categorías de impacto se divide en subcategorías o aspectos más detallados que se necesitan evaluar, por ejemplo, Salario justo y Horas de trabajo se encuentran dentro de la categoría de impacto de Condiciones de trabajo (UNEP Setac Life Cycle Initiative, 2022).

Finalmente, en esta sección se incluye también la descripción de la UF, la Figura 3.31. muestra el flujo de trabajo para definir la UF en un ACV-S. Este flujo de trabajo se desglosa en tres componentes principales: características fundamentales, que establecen la base para entender qué es importante para los usuarios y cómo un producto o servicio debe cumplir con sus expectativas. Función,

se describe lo que hace el producto o servicio y es esencial para definir cómo se va a medir y comparar con otros productos o servicios; y finalmente la definición de la UF que es una medida clave que permite la evaluación comparativa de productos o servicios, asegurando que las comparaciones sean consistentes y basadas en una métrica común (Benoît et al., 2020).



Figura 3.31. Pasos para identificar la unidad funcional (Adaptado de Benoît et al., 2020)

### 3.4.2 Análisis de inventario

La fase de inventario, como ya se ha explicado en apartados anteriores, constituye el punto en el que se recopilan datos, se modelan sistemas y se obtienen resultados.

El análisis de inventario aplicado al enfoque de escala de referencia se desarrolla según las siguientes etapas: 1) selección de Indicadores de desempeño (ID) y Puntos de Referencia de Desempeño (PRDs), en esta fase se eligen los indicadores específicos que permitan evaluar el desempeño social en comparación con puntos de referencia predefinidos. Se establecen indicadores cuantitativos y cualitativos que reflejen las condiciones sociales en las distintas fases del ciclo de vida; 2) recolección de datos específicos del inventario relacionados con los indicadores seleccionados. Los datos pueden proceder de fuentes primarias y secundarias, incluyendo encuestas, entrevistas y bases de datos existentes; 3) análisis de relevancia, etapa en la que se identifican los procesos unitarios más relevantes en función de su impacto social; 4) evaluación de PRDs, fase en la que

se comparan las condiciones sociales a lo largo de la cadena de valor con los puntos de referencia establecidos; 5) construcción del Modelo de Inventario, fase en la que se integran todos los procesos y datos recopilados en un modelo de inventario completo, utilizando software de modelado para compilar y analizar los datos del inventario; 6) evaluación de la Calidad de los Datos y Manejo de la Incertidumbre, etapa en la que se verifican la precisión y calidad de los datos recopilados, mediante la realización de análisis de sensibilidad y gestión de incertidumbres para asegurar la robustez de los resultados; 7) informe de Resultados, etapa en la que se crean informes detallados que incluyan los datos recopilados, análisis realizados y conclusiones obtenidas para documentar y reportar los hallazgos del análisis de inventario (UNEP, 2009).

En el enfoque de ruta de impacto (específico), tiene la característica que incluye datos de inventario con indicadores de impacto, que pueden recopilarse a través de una revisión bibliográfica, entrevistas o en búsqueda en la web. También pueden obtenerse de bases de datos existentes con información para diferentes propósitos y niveles de detalle. La información sobre algunas de estas bases de datos se proporciona en la Tabla 3.10.

Las dos primeras bases de datos en la tabla, realizan directamente evaluaciones de puntos críticos y ACVs sociales de productos utilizando software o herramientas en línea. Otras bases de datos, como RepRisk, proporcionan datos sobre riesgos corporativos. Además, existen bases de datos estadísticas que proporcionan datos en bruto, por ejemplo, sobre desarrollo económico, condiciones laborales, salarios, educación, etc. Algunas o todas estas bases de datos estadísticas se han utilizado como fuentes para bases de datos específicas de ACV social (Benoît et al., 2020).

#### 3.4.2.1 Bases de datos

Los datos del inventario pueden ser datos primarios o específicos del sitio. Su recogida se puede realizar mediante una auditoría social, la cual implica el uso de documentación empresarial, como nóminas y sistemas de gestión, así como el acceso a información proporcionada por autoridades gubernamentales u organizaciones no gubernamentales. Este proceso puede incluir entrevistas dirigidas y semidirigidas, cuestionarios y encuestas (UNEP, 2009).

La información recopilada sobre las partes interesadas y subcategorías de impacto seleccionadas, se debe completar mediante consulta a los “*Stakeholders*” involucrados antes de proceder con el inventario en sí, ya que es durante la

consulta cuando pueden surgir diferentes temas de preocupación o adicionales. En cada ubicación geográfica de la cadena de valor del producto, los impactos sociales y socioeconómicos pueden afectar a las seis categorías principales de partes interesadas (Benoît et al., 2020), que se presentan en la Tabla 3.9.

También se puede consultar y considerar a otras categorías de partes interesadas (p.e. ONGs, autoridades públicas/estado y futuras generaciones) u otros subgrupos (por ejemplo, accionistas, proveedores, socios empresariales).

Los datos también se pueden recopilar a través de bases de datos genéricos existentes para ser utilizados con inventarios (p.e. económicos). En la Tabla 3.10. se presenta información sobre bases de datos gratuitas y con licencia que se pueden utilizar para establecer el inventario en los softwares específicos descritos en el apartado correspondiente del ACV social genérico, con enfoque basado en datos económicos.

Tabla 3.10. Lista de bases de datos social más relevantes

Base de datos	Características
Social Hotspots Database (SHDB) (SHDB, 2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contiene datos para 26 subcategorías de impacto utilizando más de 160 indicadores cualitativos, cuantitativos y semicuantitativos sobre riesgos sociales, oportunidades e impactos positivos.</li> <li>- Cubre aprox. 13.000 sectores industriales específicos de cada país en 244 países según la base de datos de input/output del proyecto de análisis de comercio global (<i>Global Trade Analysis Project, (GTAP)</i>).</li> <li>- Incluye un método de evaluación de impacto.</li> <li>- Los riesgos y oportunidades sociales se miden en horas de trabajo y variables de actividad de valor añadido por proceso.</li> </ul>
Product Social Impact Life Cycle Assessment (PSILCA) (GreenDelta, 2022)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contiene datos para 19 subcategorías y 65 indicadores cualitativos, cuantitativos y semicuantitativos sobre riesgos sociales y medioambientales, oportunidades e impactos positivos.</li> <li>- Cubre unos 15.000 sectores industriales y materias primas específicos de 189 países a partir de la base de datos Input/Output de Eora.</li> <li>- Se proporciona información sobre la calidad de los datos para cada punto de dato y puede calcularse para todo el sistema de productos.</li> </ul>
GaBi Life Cycle Working Environment (Sphera, 2024)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proporciona datos de inventario social (accidentes, cualificación de los trabajadores y algunos otros...) para 15.000 procesos y productos.</li> <li>- Los datos de inventario social a nivel de proceso unitario se agregan en paralelo a los datos del inventario ambiental a lo largo del ciclo de vida (desde la cuna hasta la puerta).</li> </ul>

Base de datos	Características
<p>RepRisk (RepRisk, 2022)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ofrece un conjunto de soluciones premium de gestión de riesgos y cumplimiento normativo, principalmente a inversores institucionales (por ejemplo, bancos, proveedores de seguros, gestores de activos, etc.), para prevenir y gestionar los riesgos de conducta empresarial.</li> <li>- La principal característica es la Plataforma de Riesgos ESG (<i>Environmental, Social &amp; Governance</i>), que es la mayor base de datos sobre riesgos y conducta empresarial. Apoya la toma de decisiones basada en datos, proporcionando datos cuantitativos y cualitativos sobre empresas, proyectos, sectores, países, cuestiones ASG, ONG, etc.</li> </ul>
<p>International Labour Organization (ILO) database (ILO, 2024)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conjunto de bases de datos para diferentes temas: Departamento de Estadísticas de la OIT (ILOSTAT), Indicadores Clave del Mercado Laboral (KILM), Encuesta de Fuerza Laboral (LFS), Información sobre Trabajo Infantil.</li> <li>- Contiene estadísticas laborales para 165 economías, incluidos datos sobre empleo por sector económico, salarios por hora, horas de trabajo semanales, trabajo infantil, desempleo y huelgas anuales. En algunos casos, también están disponibles datos trimestrales o mensuales.</li> </ul>

La base de datos SHDB presenta como ventaja una amplia cobertura de indicadores sociales que cubren múltiples aspectos del impacto social, lo que permite una evaluación detallada de los riesgos sociales en las cadenas de suministro. También permite la detección de puntos críticos (Hotspots), puntos donde se concentran los riesgos sociales. Esto facilita la focalización de esfuerzos en las áreas más problemáticas. SHDB ofrece datos desagregados por país y sector, lo que permite una evaluación específica y contextualizada de los impactos sociales, y además la base de datos se actualiza regularmente para incluir los datos más recientes y relevantes, asegurando que los análisis sean precisos y pertinentes (Du et al., 2019).

PSILCA proporciona una amplia variedad de indicadores sociales que pueden ser utilizados para evaluar los impactos a lo largo del ciclo de vida de los productos. Incluye datos específicos de sectores y países, lo que permite una evaluación precisa de los riesgos sociales. Sin embargo, es menos detallada en la identificación de "hotspots" específicos en comparación con SHDB y puede requerir una

integración adicional con otras fuentes de datos para una evaluación completa (Herrera Almanza & Corona, 2020).

GaBi Life Cycle Working Environment (Sphera), ofrece una integración completa con el software GaBi, facilitando la realización de análisis ambientales y sociales de manera integrada. Proporciona datos detallados y específicos para evaluaciones de impacto social, pero puede no ser tan exhaustiva en términos de cobertura de indicadores sociales como SHDB, y la identificación de "hotspots" puede no ser tan precisa sin el uso de datos complementarios.

RepRisk está enfocada en la identificación de riesgos de reputación y sostenibilidad a través del monitoreo de medios y otras fuentes de datos. Proporciona datos en tiempo real sobre riesgos sociales y ambientales. Sin embargo, es menos específica para evaluaciones de ciclo de vida en comparación con SHDB y está más centrada en riesgos de reputación que en una evaluación integral del impacto social.

International Labour Organization (ILO) Database, ofrece datos estadísticos oficiales y confiables sobre condiciones laborales y derechos de los trabajadores a nivel mundial y es utilizada ampliamente como referencia en estudios sociales y de sostenibilidad. Su principal desventaja es que no está específicamente diseñada para evaluaciones de ciclo de vida, lo que puede limitar su aplicabilidad directa en ACV-S.

El potencial más importante de la SHDB radica en su capacidad para proporcionar una visión detallada y específica de los riesgos sociales en las cadenas de suministro globales. Su capacidad para identificar "hotspots" permite a las empresas y organizaciones focalizar sus esfuerzos en las áreas más críticas, mejorando así la sostenibilidad y la responsabilidad social en toda la cadena de valor. Esta capacidad de identificación y focalización es esencial para desarrollar estrategias efectivas de mitigación de riesgos y para comunicar de manera transparente los esfuerzos y logros en sostenibilidad social a las partes interesadas y es lo que justifica el uso de esta base de datos en esta tesis doctoral.

### **3.4.3 Evaluación e interpretación**

En las secciones anteriores se ha referido la forma estructural del ACV social mostrando conjuntamente las características del enfoque genérico mediante el riesgo social (SHDB) y el enfoque específico mediante el análisis de impacto social de producto (PSIA). Siendo el enfoque genérico un estudio preliminar para un análisis específico como se desarrollará en esta tesis.

El enfoque de escala de referencia (específico), que se desarrolla en la primera etapa del análisis de inventario, es un sistema de medición que establece niveles de desempeño social. Un PRD es un valor específico dentro de esta escala que indica un nivel particular de desempeño social o riesgo, sirviendo como umbral, objetivo o meta. Los PRDs permiten estimar la magnitud de los impactos sociales asociados con la producción y suelen basarse en estándares internacionales, legislación local o mejores prácticas de la industria.

A la hora de definir las escalas de referencia, hay que considerar si se asigna o no un valor numérico a los niveles de la escala y, de ser así, qué valor numérico se asigna a cada nivel. Los valores numéricos permiten agregar fácilmente los resultados en los pasos posteriores de la evaluación. Básicamente, las escalas de referencia pueden representarse de tres principales formas (UNEP, 2021): 1. en términos no numéricos, como colores, letras o marcas de verificación. La visualización de este tipo de resultados puede realizarse mediante cuadros, mapas de calor o descripciones narrativas; 2. con puntuaciones lineales, en las que cada nivel de la escala corresponde con una puntuación, una unidad por encima de la puntuación del nivel anterior; 3. con puntuaciones no lineales, se asigna un valor personalizado a cada nivel de la escala, considerando su distancia con respecto a los otros niveles. Por ejemplo, las escalas de la herramienta de mapeo de riesgos de Social Hotspots Data Base utilizan un enfoque no lineal, donde se otorgan más puntos a los niveles de riesgo “muy alto” y “alto” en comparación con los niveles más bajos. Esta elección de valor se basa en una revisión sistemática de la base de datos y las deliberaciones de un panel de expertos, con el objetivo de magnificar numéricamente los niveles de riesgo a medida que aumenta su gravedad, reflejando así la mayor importancia de los niveles más altos de riesgo.

Existen seis tipos principales de puntos de referencia de desempeño para las escalas de referencia:

1. Apoyado en normas y prácticas específicas. Las escalas de referencia se expresan para traducir las normas y buenas prácticas a niveles de desempeño. Para cada nivel los valores de referencia pueden ser cualitativos o cuantitativos (ver Tabla 3.11.).
2. Basado en normas, buenas prácticas y el contexto socioeconómico de los procesos unitarios. Se basa en el mismo principio que el anterior, salvo que el nivel inferior de la escala se divide en dos niveles: el más alto corresponde a un nivel de rendimiento inferior en un contexto socioeconómico favorable, y el más

bajocorresponde a un nivel de rendimiento inferior en un contexto socioeconómico desfavorable.

Tabla 3.11. Escala de referencia con valores/información de referencia (adaptado de Goedkoop et al., 2018)

Niveles de la escala	Descripción
+2	La empresa o instalación se involucra en un diálogo con la representación colectiva de los trabajadores e incorpora sus puntos de vista en las decisiones de gestión
+1	La empresa o instalación reconoce la representación colectiva de los trabajadores organizados en las negociaciones
0	La empresa o instalación tiene un sistema para hacer cumplir la política que permite la libertad de asociación y la negociación colectiva y no se han descubierto incidentes que muestren que la empresa o instalación impide la libertad de asociación y la negociación colectiva de los trabajadores.
-1	Se han descubierto incidentes que muestran que la empresa o instalación impide los derechos de los trabajadores a la libertad de asociación y la negociación colectiva, pero se ha desarrollado un plan de acción correctiva con un cronograma claro para su cumplimiento o la empresa o instalación tiene una política que permite la libertad de asociación y la negociación colectiva, pero no tiene un sistema para hacer cumplir la política
-2	Se han descubierto incidentes que muestran que la empresa o instalación impide los derechos de los trabajadores a la libertad de asociación y la negociación colectiva, pero no se ha desarrollado un plan de acción correctiva con un cronograma claro para su cumplimiento

3. Basado en conocimiento experto. Las escalas se mantienen en su forma genérica (ver Tabla 3.11.) y en la evaluación, se aplica conocimiento experto para comparar los datos del inventario con la escala. La desventaja es que son menos transparentes.

4. Basado en datos de la empresa/sector/país bajo estudio en relación con la mediana de un conjunto sectorial/país/global. Por ejemplo, fraccionando los datos según una distribución uniforme en cuartiles, correspondiendo cada uno a un nivel de la escala. De esta manera, la evaluación es relativa al rendimiento/riesgo de pares comparables.

Tabla 3.12. Escala genérica de referencia ascendente (izquierda), y escala genérica de referencia descendente, para evaluación de riesgo social (derecha) (Adaptado de Goedkoop et al., 2018)

Niveles de la Escala	Descripción	Niveles de la Escala	Descripción
+2	Desempeño ideal. El mejor en su clase		Riesgo muy alto
+1	Más allá del cumplimiento		Riesgo alto
0	Cumplimiento con las leyes locales e internacionales y/o expectativas sociales básicas		Riesgo medio
-1	Ligeramente por debajo del nivel de cumplimiento		Riesgo bajo
-2	Claramente por debajo del nivel de cumplimiento		

5. Basado en una combinación de normas específicas y el posicionamiento en una distribución. Se evalúa la posición de los datos del proceso unitario en relación con una distribución uniforme, pero alineando el nivel de cumplimiento con una norma de referencia.

6. Basado en una combinación de conocimiento experto y posicionamiento en una distribución. Se evalúa la posición de los datos del proceso unitario en relación con una distribución uniforme, pero alineando el nivel de cumplimiento con el conocimiento experto (UNEP, 2020).

Después de definir las escalas de referencia, es útil crear una lista de indicadores de desempeño utilizados en cada nivel de la escala. Los indicadores de desempeño (ID) son medidas cuantitativas o cualitativas del rendimiento y están vinculados a cada PRD en las escalas de referencia. Establecer una lista clara de indicadores de desempeño ayuda a: 1) mejorar la precisión de la escala de referencia de manera iterativa; y 2) proporcionar claridad sobre qué tipo de datos se deben recopilar para el inventario, lo que permitirá comparar posteriormente los datos del inventario con las escalas de referencia establecidas (Goedkoop et al., 2018).

Para clarificar este apartado, se utiliza el contexto de una situación de producción agrícola para ejemplificar el uso de Escala de Referencia, PRD, Indicador de desempeño, e interpretación en un ACV Social (UNEP, 2020).

En primer lugar, se define la Escala de Referencia para comparar el desempeño social de la producción agrícola con un estándar o promedio conocido. La escala de referencia podría ser el promedio nacional de condiciones laborales en

la industria agrícola. Esto incluye promedios nacionales de salario, horas de trabajo, y acceso a beneficios sociales.

En segundo lugar, se define el PRD que es un valor específico dentro de la escala de referencia que se utiliza para evaluar si las condiciones sociales cumplen con los estándares predefinidos. En el mismo estudio de una producción agrícola, un PRD podría ser el salario mínimo legal nacional para trabajadores agrícolas. Esto proporciona un estándar específico contra el cual se puede evaluar el salario pagado a los trabajadores agrícolas.

En tercer lugar, se define el ID que son métricas específicas utilizadas para cuantificar los impactos sociales en el análisis de inventario. En este ejemplo un ID en el ACV-S de la producción agrícola podría ser "salario promedio mensual de los trabajadores agrícolas de fruta de hueso". Este indicador recopila datos específicos sobre los salarios que reciben los trabajadores en las plantaciones de fruta de hueso (UNEP, 2020).

La aplicación práctica consistiría en:

Paso 1: Recopilación de Datos del ID, datos sobre el "salario promedio mensual de los trabajadores agrícolas" en diversos cultivos del país.

Paso 2: Comparación con la Escala de Referencia, comparando los datos recopilados sobre salarios con el promedio nacional de salarios en la industria agrícola nacional. Esto ayuda a contextualizar los datos dentro del marco nacional.

Paso 3: Evaluación con PRDs, para conocer si los salarios recopilados cumplen con el PRD del "salario mínimo legal en el país para trabajadores agrícolas". Si los salarios están por encima del PRD, se considera un desempeño positivo; si están por debajo, se considera una brecha que necesita ser abordada. En concreto, y siguiendo con el ejemplo, para el ID los datos muestran que el salario promedio mensual de los trabajadores de fruta de hueso es de \$250 USD. La escala de referencia indica que el promedio nacional de salarios en la industria agrícola es de \$300 USD. El PRD indica que el salario mínimo legal en nacional para trabajadores agrícolas es de \$200 USD.

La interpretación indica que los salarios en la producción de fruta de hueso (\$250 USD) están por encima del PRD (\$200 USD) pero por debajo de la escala de referencia nacional (\$300 USD). Esto indica que, aunque se cumplen los estándares mínimos legales, hay margen para mejorar los salarios para alinearlos mejor con el promedio nacional de la industria agrícola.

El enfoque de ruta de impacto, se utiliza para evaluar y modelar las relaciones entre actividades sociales/factores de estrés y sus efectos a través de rutas de impacto, que pueden ser cualitativas o cuantitativas.

- Las rutas cualitativas: Explican las interrelaciones sociales en áreas de protección, identificando temas sociales como salarios justos o trabajo infantil. Combinan hallazgos de distintas disciplinas para vincular temas sociales con actividades sociales o desafíos sociales.

- Las rutas cuantitativas: Se enfocan en números medibles y explican fenómenos específicos. Existen dos enfoques principales: en que se basa en relaciones causales medibles, como la evaluación del bienestar humano, en el que se base en correlaciones entre variables económicas, como la relación entre ingresos y salud. El análisis sigue tres pasos: establecer correlaciones empíricas, predecir impactos sociales a nivel microeconómico y calcular efectos a nivel macroeconómico (UNEP, 2020).

La Interpretación del Ciclo de Vida Social es la fase final en la cual se revisan todas las fases anteriores. Al concluir el proceso iterativo del estudio, se examinan y discuten detalladamente los resultados. Esta discusión sirve como base para las conclusiones, recomendaciones y la toma de decisiones, de acuerdo con la definición de los objetivos y el alcance del estudio.

Para interpretar los resultados, no solo se discuten y resumen, sino que también se analizan en diferentes niveles. La información y los datos pueden agregarse o desglosarse a nivel de fases del ciclo de vida, categorías de impacto, subcategorías de impacto, categorías de partes interesadas, o incluso a nivel de procesos, con el fin de extraer conclusiones. Esta fase es clave en un estudio de ACV Social, ya que determina la capacidad de presentar los resultados finales, recomendaciones y posibles mejoras a los usuarios directos y otras partes interesadas (Benoît et al., 2020).

#### **3.4.4 Aplicación del ACV social en el sector agroalimentario**

A continuación se presenta la revisión bibliográfica realizada bajo la búsqueda de "Social life cycle assessment (S-LCA); fruit ; apricot ; nectarine ; peach; agriculture" en WOS y SCOPUS, que ha permitido identificar 10 artículos relevantes en revistas científicas (ver Tabla 3.13.), de aplicación del ACV-S en el sector agroindustrial en los últimos años.

Tabla 3.13. Referencias bibliográficas sobre el ACV social en el sector agroindustrial

N.º	Referencia	Alcance	Tema	Método - base de datos	N.º de grupos interesados y subcategorías	País
1	(Kalvani et al., 2022)	<i>“Cradle to gate”</i>	Producción de arroz con cáscara	Directrices UNEP/SETAC, 2020 - Entrevistas.	3 (Trabajadores, comunidad local y agricultores) y 11 (Salud y seguridad, empleo local, asistencia con desarrollo tecnológico, y 8 más).	Malasia Irán
2	(Mancini et al., 2023)	<i>“Cradle to gate”</i>	Producción y consumo de alimentos	Directrices UNEP/SETAC, 2020 + Sustainable Development Goals - PSILCA 2017.	4 (Trabajadores, cadena de valor, sociedad y comunidad local) y 14 (Trabajo infantil, trabajo forzoso, discriminación, y 11 más).	UE
3	(Rivera-Huerta et al., 2019)	<i>“Cradle to grave”</i>	Producción ganadera	Directrices UNEP/SETAC, 2009 - Entrevistas.	4 (Trabajadores, comunidad local, sociedad y cadena de valor) y 10 (Trabajo infantil, trabajo forzoso, discriminación, y 7 más).	México
4	(Dunuwila et al., 2023)	<i>“Cradle to gate”</i>	Producción de caucho en bruto	Directrices UNEP/SETAC, 2020 + Fichas Metodológicas ACV-S 2011 - SHDB v4 + Datos estadísticos.	3 (Trabajadores, comunidad local y sociedad) y 25 (Trabajo infantil, trabajo forzoso, discriminación y 22 más).	Sri Lanka
5	(Costa & Oliveira, 2022)	<i>“Gate to gate”</i>	Materias primas para biodiesel	Directrices UNEP/SETAC, 2009 - Datos estadísticos.	1 (Trabajadores) y 5 (Trabajos forzados, salario justo, horas de trabajo y 2 más).	Brasil
6	(Tecco et al., 2016)	<i>“Cradle to gate”</i>	Producción de frambuesas	Directrices UNEP/SETAC, 2009 + fichas metodológicas ACV-S, 2013 - Entrevistas.	2 (Trabajadores y cooperados) y 11 (Salarios justos, migración, condiciones laborales y 8 más).	Italia
7	(Prasara-A & Gheewala, 2021)	<i>“Cradle to gate”</i>	Cultivo de caña de azúcar y yuca	Directrices UNEP/SETAC, 2009 - Entrevistas.	4 (Comunidad local, trabajadores y 2 más) y 17 (Salud y seguridad, desarrollo tecnológico, horas de trabajo y 14 más).	Tailandia

N.º	Referencia	Alcance	Tema	Método - base de datos	N.º de grupos interesados y subcategorías	País
8	(Arcese et al., 2017)	<i>"Cradle to grave"</i>	Sector vitivinícola	Directrices UNEP/SETA C, 2009 + Fichas Metodológicas ACV-S 2013 - Datos estadísticos y entrevistas.	5 (Trabajadores, comunidad local y 3 más) y 40 (Desarrollo tecnológico, contribución al desarrollo tecnológico y 38 más).	Italia
9	(D'eusanio et al., 2018)	<i>"Cradle to gate"</i>	Producción de miel	Directrices UNEP/SETA C, 2009 + Fichas Metodológicas UNEP/SETA C, 2013 - Entrevistas.	5 (Trabajadores, consumidores y 3 más) y 32 (Horas de trabajo, salario justo, trabajos forzados y 29 más).	Italia
10	(Michaliszyn-Gabryś et al., 2024)	<i>"Cradle to grave"</i>	Sistema de control de malezas por láser	Directrices UNEP/SETA C, 2009 + Fichas Metodológicas UNEP/SETA C, 2013- Entrevistas.	3 (Agricultores, sociedad y negocio) y 13 (Riesgos operacionales, salud y seguridad, y 11 más).	Polonia Bélgica España

En los artículos encontrados que abarcan diversos tópicos dentro del sector agroalimentario, los autores principalmente seleccionaron el alcance de *"cradle to gate"* con un 80% y el 20% utiliza *"cradle to grave"*, presentándose un interés predominante en evaluar el impacto ambiental desde la producción hasta la salida al mercado del producto. Lo que evidencia la necesidad de analizar el resto del ciclo de vida. Los métodos más utilizados fueron con un 70% las directrices metodológicas de ACV-S del 2009 y con 30% las directrices metodológicas del año 2020. Ambas metodologías fueron complementadas en tres estudios, con las fichas metodológicas del año 2011 y con las del año 2013.

Los datos de inventario proceden fundamentalmente de entrevistas (60%), seguido por datos procedentes de bases estadísticas (30%) y finalmente a partir de las bases de datos SHDB (5%) y PSILCA (5%), evidenciándose una preferencia por las entrevistas como fuente principal de datos, seguido de datos procedentes de bases de datos estadísticas, lo que sugiere un enfoque cualitativo en la recopilación de información.

Respecto a la elección de grupos interesados, los estudios consideraron por término medio 4 categorías de partes interesadas, siendo el máximo de 5 y el mínimo de 1 por análisis. Las partes interesadas seleccionadas preferentemente fueron trabajadores y comunidad local, lo que refleja una preocupación por abordar las perspectivas de aquellos directamente afectados por las actividades agrícolas.

Respecto a la elección de subcategorías de impacto, el promedio por artículo fue de 19, con un mínimo de 5 y el máximo de 40. Las subcategorías más utilizadas fueron trabajo justo, salud y seguridad, trabajo forzoso y trabajo infantil, lo que apunta a un enfoque integral y una preocupación preferente por los aspectos laborales y sus implicaciones.

Respecto a los temas tratados en los estudios analizados, se encuentran una gran variedad en el ámbito de la producción agroindustrial. En el área agroalimentaria se presenta un estudio que evalúa el impacto social de la introducción de nuevas tecnologías en el control de malas hierbas basado en la tecnología láser. También se presenta la evaluación del escenario de innovación en la producción de frambuesas utilizando acolchados (mulching) y coberturas. No hay presencia de estudios que evalúen un escenario de innovación tecnológica en el sector productivo de fruta o específicamente fruta de hueso.

### 3.5 Metodología Análisis de Sostenibilidad de Ciclo de Vida

Este enfoque requiere evaluar la variedad de impactos y efectos en función de diferentes aspectos y momentos en que se manifiestan (Kloepffer, 2008). En este contexto, "el medio ambiente intacto, la justicia social y la prosperidad económica" se plantean como objetivos finales y criterios de evaluación para abordar la dimensión horizontal. Además, se destaca la necesidad de aplicar una perspectiva de pensamiento de ciclo de vida para explorar la dimensión longitudinal, considerando tanto los impactos directos como los indirectos a lo largo de las fases de vida del producto o proceso y la escala de tiempo de los impactos, reflexionando sobre la relación entre las necesidades presentes y las oportunidades futuras (Finkbeiner et al., 2010).

La iniciativa UNEP-SETAC busca promover el uso global de conocimientos sobre el ciclo de vida para los responsables de la toma de decisiones. Esta iniciativa exploró cómo integrar los aspectos sociales con los medioambientales y lograr un análisis de sostenibilidad de ciclo de vida completo (Zanni et al., 2020). El proceso culminó con el informe "Hacia el Análisis de Sostenibilidad de Ciclo de Vida: tomando decisiones informadas sobre productos" (UNEP, 2011), que presenta el análisis de sostenibilidad como la combinación de las técnicas de ACV-A CCV, y ACV-S. Esta metodología ha sido ampliamente citada en las publicaciones sobre ASCV.

El documento estratégico 2017-22 de Life Cycle Initiative, (2017) presenta la "Teoría del Cambio de la Iniciativa del Ciclo de Vida", que promueve el asesoramiento técnico para mejorar la aplicabilidad de diversas metodologías en estudios específicos, orienta la investigación científica y la implementación práctica, y apoya el desarrollo de herramientas gubernamentales para identificar puntos conflictivos. Además, establece medidas para evaluar logros progresivos a corto, medio y largo plazo, con objetivos hasta 2022, 2026 y 2030 (Life Cycle Initiative, 2017). La Iniciativa también busca fomentar el uso del enfoque ACV para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de la ONU de manera más rápida y eficiente. Entre los indicadores para medir el logro de estos objetivos se incluyen el número de gobiernos y organizaciones que adoptan políticas basadas en ACV, empresas que toman decisiones con base en ACV, responsables de toma de decisiones que aplican estos enfoques, partes interesadas capacitadas, y organizaciones que utilizan los conocimientos desarrollados (Zanni et al., 2020). Sin embargo, actualmente hay pocas publicaciones que integren globalmente los ODS con la metodología ASCV.

En esta tesis se va a seguir la estructura metodológica de la norma ISO 14040 pero aplicada para el ASCV, según las pautas de la Iniciativa del Ciclo de Vida UNEP-SETAP (UNEP, 2011) (ver Figura 3.32.).

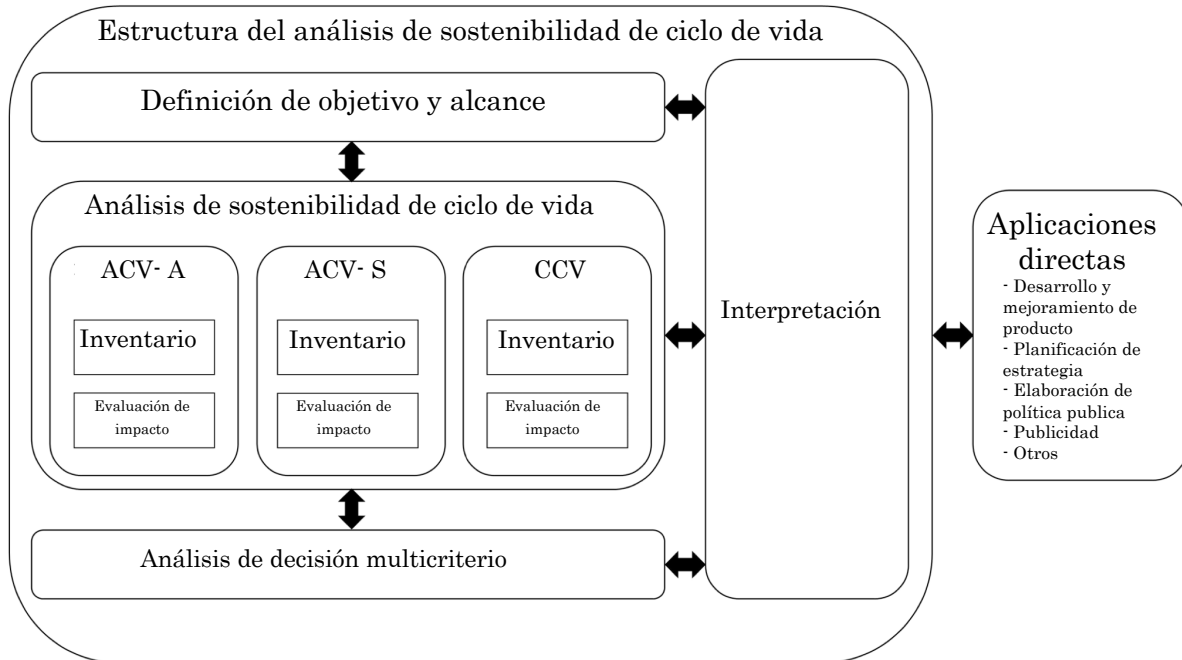


Figura 3.32. Estructura metodológica ASCV para el diseño sostenible (adaptado de Wilson et al., 2023)

### 3.5.1 Definición de objetivo y alcance

Es importante asegurar que las tres metodologías (ACV-A, CCV y ACV-S) compartan un mismo objetivo, alcance y unidad funcional. Se sugiere mantener consistencia en los límites del sistema al aplicar cada metodología, considerando que un proceso puede ser relevante para una técnica y no para otra. Por lo que es importante establecer criterios del alcance apropiados para cada metodología.

En un ASCV, el inventario y los indicadores de impacto deben relacionarse con una unidad funcional de producto común (ver Figura 3.33.), que es la base de todas las técnicas descritas. Al igual que en el ACV-S, se recomienda que la unidad funcional describa tanto la utilidad técnica del producto como su utilidad social (UNEP, 2011).

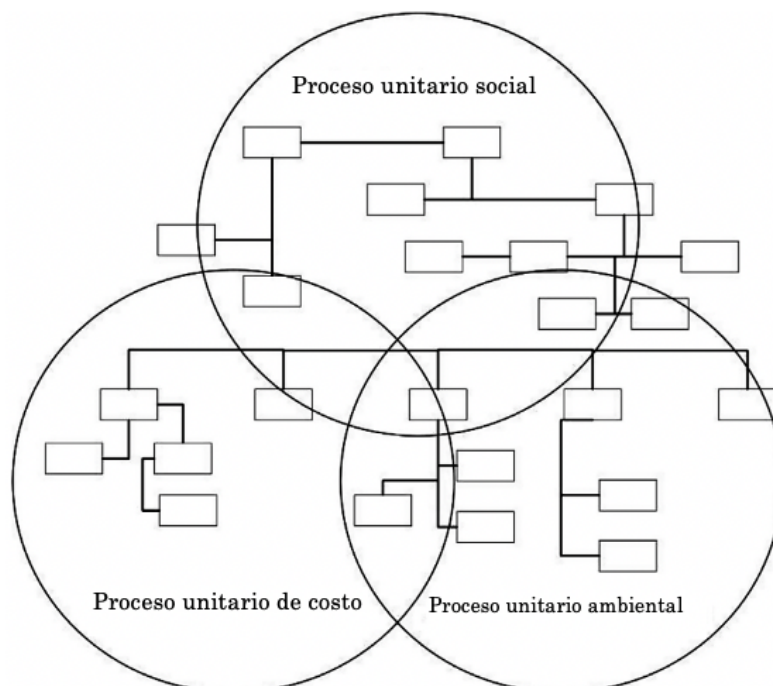


Figura 3.33. Límites de sistema del ASCV (adaptado de Yang et al., 2019)

### 3.5.2 Análisis de inventario de ciclo de vida

En el ASCV, el inventario rastrea los intercambios entre los procesos, las organizaciones y el medio ambiente, generando impactos ambientales, económicos y sociales. Para garantizar la consistencia entre los tres pilares (ambiental, económica y social), se recomienda que la recolección de datos se realice tanto a nivel de proceso unitario como organizacional. La disponibilidad de datos puede representar un desafío, especialmente en países en desarrollo y en pequeñas y medianas empresas. Es fundamental recopilar datos cuantitativos, cualitativos y semicuantitativos, especialmente en ACV social. Aunque los datos para la ACV y el CCV son más accesibles, los datos sociales aún son limitados, aunque se están desarrollando bases de datos específicas.

### 3.5.3 Evaluación e interpretación de impacto de ciclo de vida

Es recomendable implementar los pasos de clasificación y caracterización según las normas ISO 14040 e ISO 14044, ya que son esenciales para la evaluación de impactos. En la clasificación, los datos del inventario se asignan a categorías de impacto, pero la falta de modelos de caracterización para todas las categorías puede impedir la conversión de todos los datos en unidades comunes. Por lo que se propone utilizar un marco combinado que incluya ACV, CCV y ACV social.

Para apoyar el proceso de caracterización, los indicadores del ciclo de vida ambiental y los criterios económicos se pueden combinar con la evaluación social mediante metodologías de evaluación.

La investigación de Oliveira & Souza, (2023) ofrece recomendaciones para mejorar el marco metodológico de futuros estudios, destacando especialmente el uso del Método de Análisis de Decisiones Multicriterio (MCDA). Este método es crucial para priorizar criterios en diversas áreas, como la contratación sostenible, jerarquizando integralmente las categorías de impacto en los ámbitos ambiental y social. El MCDA es altamente valorado por su capacidad para equilibrar e integrar complejidades, proporcionando un enfoque holístico en procesos de toma de decisiones complejos, como en el sector agrícola (De Luca et al., 2017). Numerosos estudios han integrado herramientas de ACV con métodos MCDA, lo que permite abordar aspectos como las escalas de evaluación del impacto, la selección de indicadores de sostenibilidad, y la ponderación y agregación de resultados específicos. En este contexto, los enfoques participativos han demostrado ser efectivos.

Un segundo esquema propuesto por Finkbeiner et al. (2010), es el tablero de sostenibilidad del ciclo de vida que presenta la visualización de los datos como una composición de evaluaciones diferentes e independientes, realizadas por separado sobre los tres aspectos relevantes de la sostenibilidad. Teniendo los resultados por área es posible realizar una evaluación integral de sostenibilidad y, por lo tanto, se podrá integrar las evaluaciones sistémicas adicionales mediante un programa informático que genera las gráficas (ver Figura 3.34.).

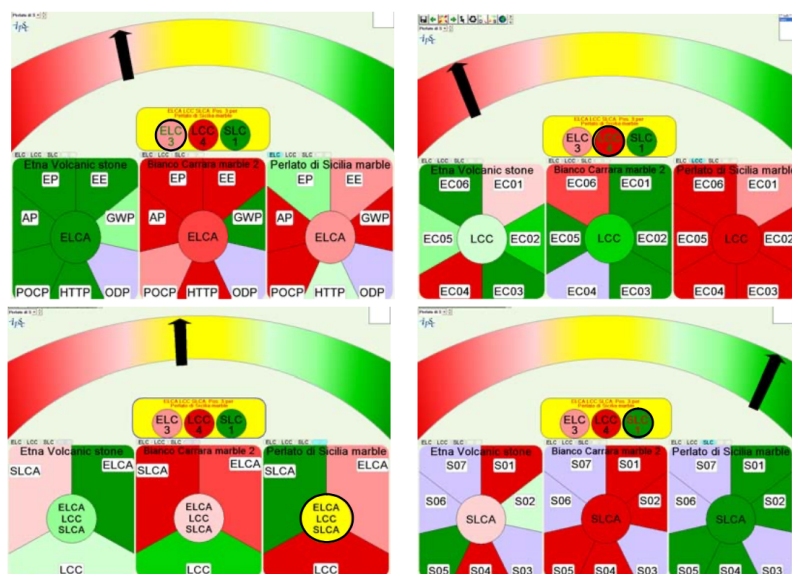


Figura 3.34. Esquema grafico del panel de sostenibilidad del ciclo de vida (Finkbeiner et al., 2010)

El método del Triángulo de Sostenibilidad del Ciclo de Vida, que integra las tres perspectivas (ambiental, económica y social) en un diagrama ternario, de forma similar a la caracterización geológica de las texturas del suelo. Según Hofstetter et al. (1999) es posible visualizar los impactos ambientales, económicos y sociales a partir de los pesos relativos asignados. La Figura 3.35. muestra una representación de un conjunto de ponderaciones hipotéticas. Este esquema se sugiere como una herramienta valiosa para la comparación de escenarios. En particular, la evaluación de la ponderación relativa se realiza siguiendo patrones de dominancia a lo largo de los ejes, comenzando desde las tres esquinas, donde cada una de las áreas de desempeño evaluadas (ambiental, económica y social) se califica individualmente al 100%.

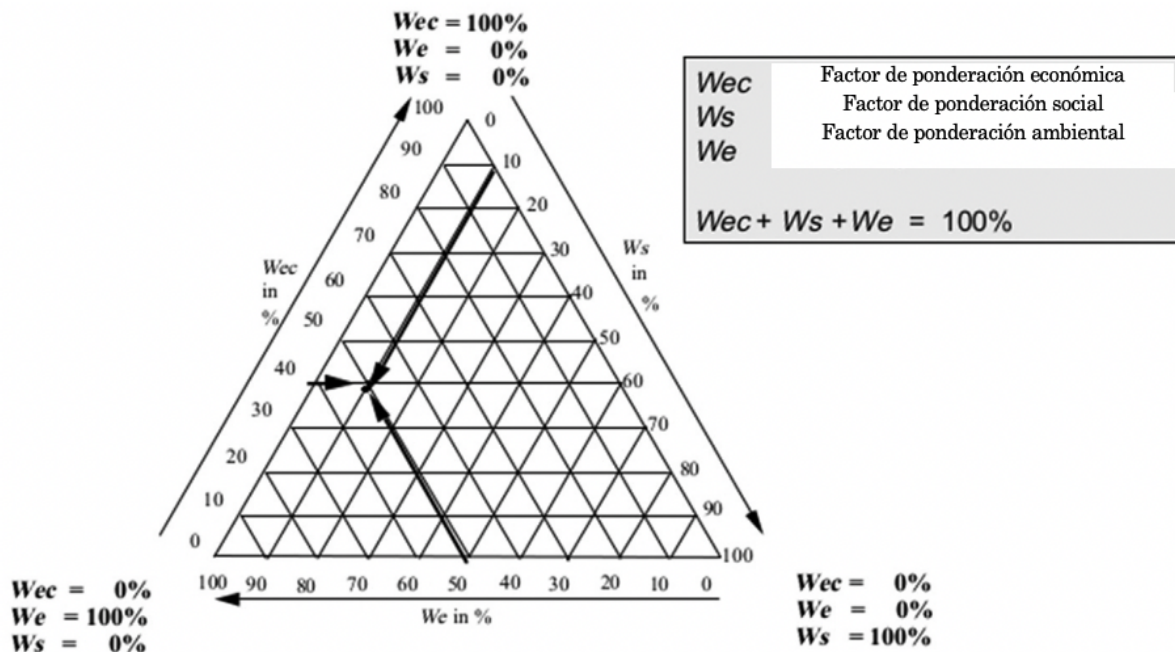


Figura 3.35. Ejemplo de esquema de ponderación en ASCV, presentado por (Finkbeiner et al., 2010)

Es clara la importancia de una estandarización de los procesos y las metodologías para desarrollar estudios, aplicar unidades de medida universalmente certificadas y contabilizar y evaluar impactos. Los ASCV pueden aprovechar las experiencias anteriores consolidadas en herramientas y enfoques similares (Belton & Stewart, 2002).

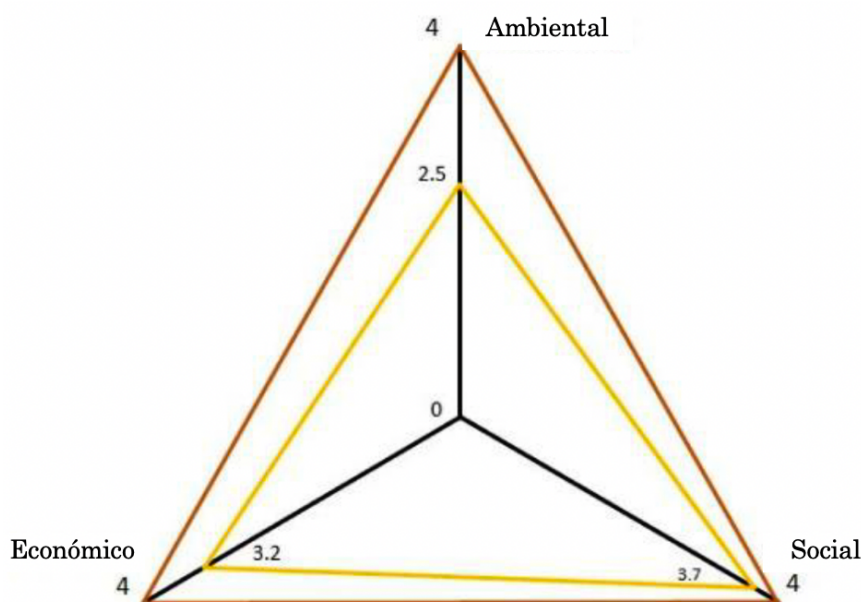


Figura 3.36. Triángulo de las tres esquinas de la sostenibilidad (Omran et al., 2021)

Otro enfoque de visualización que utiliza la forma de un triángulo ha sido desarrollado de manera independiente por (Omran et al., 2021), que utiliza los resultados del ASCV empleando las tres dimensiones de la sostenibilidad como los tres vértices del triángulo (ver Figura 3.36.). El triángulo tiene como propósito ilustrar el equilibrio relativo entre las dimensiones de la sostenibilidad y, por ende, identificar la tendencia del desempeño sostenible a lo largo del tiempo mediante la repetición regular de esta evaluación gráfica. Este enfoque se considera eficaz para comparar la visión general de diferentes alternativas y detectar los desequilibrios dentro de las dimensiones de la sostenibilidad.

### 3.5.4 Publicaciones relacionadas con la metodología ASCV

La revisión bibliográfica realizada sobre las publicaciones científicas que en los últimos tres años (06/2020-09/2024) han estudiado o aplicado la metodología ASCV permitió identificar 122 artículos en revistas científicas, 7 artículos en congresos y 13 capítulos de libros en WOS y SCOPUS. En la Figura 3.37. se presenta la distribución total de las publicaciones en porcentaje por tema de estudio en el período 2020-2024. También se presenta el número de publicaciones por área al año. En los años 2021 y 2022, se observó un aumento significativo en el número de publicaciones en todas las áreas de estudio en comparación con el año 2020 y 2023. En el año 2024 aumentaron las publicaciones, pero por segundo año consecutivo no se encontraron estudios en el área de la agroindustria.

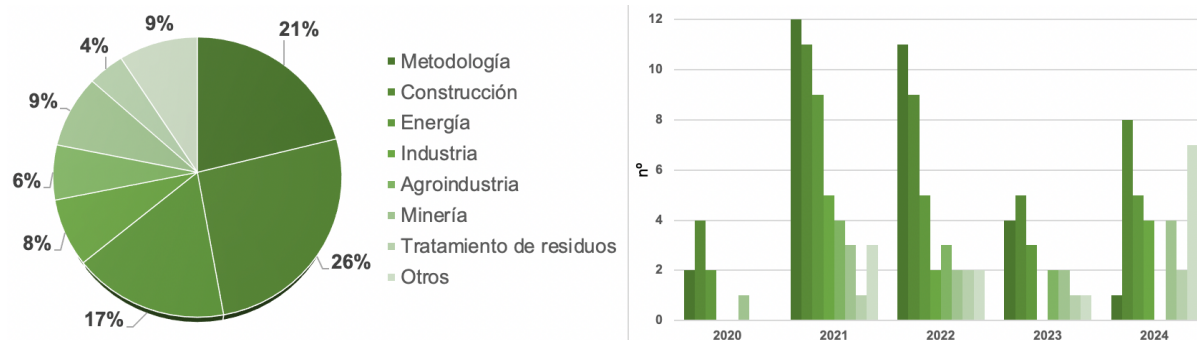


Figura 3.37. Distribución de las publicaciones en ASCV entre los años 2020-2024

Debido a que la metodología ASCV está en constante desarrollo, estas publicaciones abordan diversos aspectos en discusión que van desde los conceptos estructurales de la metodología, hasta las medidas prácticas necesarias para manejar las diferencias en límites de sistema y alcance entre áreas, con el fin de reducir discrepancias futuras.

Las investigaciones sobre el desarrollo y la aplicación de la metodología ASCV en las áreas de producción y construcción fueron los temas predominantes de publicación, seguidos por estudios en los sectores de energía e industria, aunque solo el 8% de los trabajos se han enfocado en aplicaciones agroindustriales.

Con el objetivo de obtener una visión global de las últimas investigaciones sobre avances recientes en la metodología, especialmente en el área agroindustrial, se han analizado los artículos más citados en esta área en los últimos 10 años, considerando aspectos clave como la unidad funcional, el alcance, el marco metodológico general, el método específico para cada área, el número de indicadores y la interpretación de los resultados (ver Tabla 3.14.).

Tabla 3.14. Resumen de estudios aplicando ASCV en el área agroindustrial

N.º	Referencia	Unidad funcional / alcance	Método ACV-A / (N.º de indicadores)	Método CCV/ (N.º de indicadores)	Método ACV-S / (N.º de indicadores)	Metodología interpretación de resultados
1	(Zanni et al., 2020)	1 kg de leche estandarizada / "cradle to farm gate"	ReCiPe / (12) Cambio climático, eutrofización agua dulce y 10 más	CCV ambiental/ (2) ingresos netos producción de leche y carne	(Entrena-Barbero et al., 2024) / (2) Apoyo a la economía local e indicadores de salud y seguridad (6)	Interpretación conjunta para la evaluación de la sostenibilidad y circularidad

N.º	Referencia	Unidad funcional / alcance	Método ACV-A / (N.º de indicadores)	Método CCV/ (N.º de indicadores)	Método ACV-S / (N.º de indicadores)	Metodología interpretación de resultados
2	(Zeug et al., 2023)	1 MJ de combustible / "cradle to refinery gate"	ReCiPe, Impact World+ y Environmental Footprint / (21) Cambio climático, eutrofización agua dulce y 19 más	SoCa - RESPONSA / (47) Tasa de empleados extranjeros, tasa de migración neta, nivel de remuneración promedio y 44 más	SoCa - RESPONSA / (24) Empleadas en puestos directivos, pago según salario básico, y 22 más	Evaluación holística e integrada de ciclo de vida (HLCSA)
3	Savian et al., (2023)	1 kg de peso vivo de cerdo/ "cradle to farm gate"	CML impact methods 2001/ (3) Alerta global, acidificación y eutrofización	CCV ambiental / (3) Costo de producción, rentabilidad y productividad laboral	UNEP-SETAC, (2009)/ (3) Ingresos agrícolas, salario justo y horas de trabajo/año	Triángulo de sostenibilidad del ciclo de vida
4	Zira et al., (2023)	1 t de proteína animal / "cradle to farm gate"	ReCiPe / (10) Cambio climático, eutrofización del agua dulce, eutrofización marina, y 7 más	CCV ambiental / (2) Valor actual neto y tasa interna de rentabilidad	UNEP, 2020 / (3) Tiempo de riesgo social de los trabajadores agrícolas y comunidad local.	Puntos de insostenibilidad relativa (RUSP)
5	Kokemohr et al., (2022)	1 kg de canal de novillo / "cradle to farm gate"	ReCiPe / (6) Potencial de calentamiento global, potencial de acidificación terrestre, potencial de eutrofización del agua dulce y 3 más	Modelos basados en agentes + Programación matemática / (2) Margen de contribución y coste variable	UNEP, 2020 / (3) Tiempo de trabajo, calorías y proteínas consumibles por el ser humano	Combinación de resultados mediante método de puntuación
6	(Zeug et al., 2022)	1469,0 kg de vigas de madera laminada enchapada / "cradle to gate"	ReCiPe y Environmental Footprint / (22) Cambio climático, eutrofización agua dulce, y 18 más	SoCa - RESPONSA / (56) Tasa de empleados extranjeros, tasa de migración neta, y 54 más	SoCa - RESPONSA / (21) Participación en el capital, participación en las utilidades y bonificaciones, y 19 más	HLCSA

N.º	Referencia	Unidad funcional / alcance	Método ACV-A / (N.º de indicadores)	Método CCV/ (N.º de indicadores)	Método ACV-S / (N.º de indicadores)	Metodología interpretación de resultados
7	(Omran et al., 2021)	1 t de aceite de palma en bruto / <i>“cradle to gate”</i>	Eco-indicator 99 / (9) GEI, ecotoxicidad, acidificación, eutrofización y 5 indicadores más	CCV ambiental / (4) Costo de inversión inicial, costos de operación y mantenimiento, y costo de final de vida	UNEP-SETAC, 2009 / (3) Satisfacción laboral, salario justo, condiciones de vida seguras y saludable	Combinación de resultados mediante método de puntuación
8	Nieder-Heitmann et al., (2019)	1 kg de bioproducto / 1 kWh de central termoeléctrica combinada / <i>“cradle to gate”</i>	IMPACT 2002 y CML impact methods 2001/ (2) Calentamiento global y demanda de agua	AspenTech, 2019 / (5) Rentabilidad, inversión total de capital, coste total de producción y madurez técnica	UNEP-SETAC, 2009 / (1) Creación de empleo	Análisis de decisiones multicriterio (MCDA)
9	Valente et al., (2019)	1 kg de Hidrógeno/ <i>“cradle to gate”</i>	CML impact methods 2001/ (2) Calentamiento global y Acidificación potencial	UNEP/SETAC, (2011)/ (1) Coste nivelado	UNEP-SETAC, 2009 / (3) Trabajo infantil, diferencias salariales entre hombres y mujeres y gasto sanitario.	Interpretación conjunta para la evaluación de la sostenibilidad
10	Mahbub et al., (2019)	1 MJ de éter de oximetileno / <i>“cradle to grave”</i>	UNEP, 2021 / (3) Emisiones de gases de efecto invernadero, emisiones de hollín y agotamiento del agua	AspenTech, 2013/ (3) Coste de capital, coste operativo y coste global	Hojas metodológicas/ (3) Potencial de empleo y salario, y prestaciones de los empleados	Toma de decisiones multicriterio – PROMETHEE
11	(Chen & Holden, 2018)	1 kg de leche estandarizada en grasa y proteínas / <i>“cradle to farm gate”</i>	(W. H. Chen & Holden, 2018) / (13) Potencial de calentamiento global, potencial de acidificación, potencial de eutrofización, y 10 más	(O'Brien et al., 2015) / (4) Costo de producción, rentabilidad, productividad de la tierra y productividad del trabajo	(O'Brien et al., 2015) / (13) Salud y seguridad, tiempo de trabajo, condiciones de vida pública empleo, creación de empleo, y 9 más	Análisis multicriterio

N.º	Referencia	Unidad funcional / alcance	Método ACV-A / (N.º de indicadores)	Método CCV/ (N.º de indicadores)	Método ACV-S / (N.º de indicadores)	Metodología interpretación de resultados
12	(De Luca et al., 2018)	1 ha de cultivo de olivos / <i>“cradle to farm gate”</i>	CML impact methods 2001/ (3) Cambio climático, toxicidad y uso del Suelo	CCV ambiental / (3) Rentabilidad, costes y viabilidad de la inversión	(De Luca et al., 2018)/ (3) Salud social, oportunidades laborales y contribución al bienestar nacional	MCDA y Proceso de jerarquía analítica (AHP)
13	(Martínez-blanco et al., 2014)	1 t de tomate / <i>“cradle to grave”</i>	CML impact methods 2001 / (10) Agotamiento abiótico, acidificación, eutrofización, y 7 más	CCV ambiental / (3) Precio de mercado de fertilizantes, precio del transporte y costes adicionales de aplicación	(Martínez-blanco et al., 2014) / (15) Libertad de asociación y negociación colectiva, y 11 más	No contempla
14	(Nzila et al., 2012)	1 m <sup>3</sup> de biogás / <i>“cradle to grave”</i>	(Nzila et al., 2012) + CEENE / (3) Agotamiento de recursos, cambio climático y demanda de energía	FODA/ (3) Coste de inversión, coste laboral y autonomía energética	Análisis técnico no social / (3) Balance energético, período de amortización de la energía y fiabilidad operativa	Análisis de sostenibilidad multicriterio

Respecto al alcance seleccionado por los estudios, predomina con un 79% el alcance de la cuna a la puerta (*“cradle to gate”*) y el restante 21% desde la cuna a la tumba o fin de vía (*“cradle to grave”*).

Respecto a la elección del marco metodológico, se observa que el 32% de los estudios sigue el marco propuesto por Kloepffer, (2008). Un 23% se basó con en el estudio de UNEP, (2011) “Hacia una evaluación de la sostenibilidad del ciclo de vida: tomar decisiones informadas sobre los productos”. Finalmente un 15% de los estudios emplean las metodologías descritas por las normas ISO 14040, (2006); ISO 14044, (2006).

En relación al área de estudio dentro del sector agroindustrial, se observa que el 38% de los estudios se centran en el área de producción de cultivos, como olivo, tomate, caña de azúcar, palma y forestal. El 31% corresponde al área de producción animal en porcinos y bovinos para leche y carne. El restante 31% corresponde a la

generación de biocombustibles a partir de la producción de biomasa o utilización de biomasa de desechos de actividades agroindustriales.

En relación al método utilizado para cuantificar el impacto en el área del ACV-A, el más aplicado es CML (Guinee, 2002) con un 39%, seguido por el método ReCiPe (Guinee, 2002) con un 30%, luego con un 20% los métodos; IMPACT (Goedkoop et al., 2009), Environmental Footprint (EF)(Bulle et al., 2019; Jolliet et al., 2003) y el método del panel Intergubernamental del cambio climático (IPCC) (European Commission, 2021). El promedio de métodos utilizados es de 1,4 y un promedio de 7,5 indicadores por estudio.

En el área económica el método más utilizado con un 30% es el presentado por (IPCC, 2006a), seguido con un 15% los métodos AspenTech, (2013) y soCA + RESPONSE (Eisfeldt, 2017; UFZ, 2021). El 15% de los artículos utiliza dos métodos en CCV, y en promedio utilizan 11 indicadores por estudio.

En el área social el método más utilizado es el presentado en “Directrices para la evaluación del ciclo de vida social de los productos” (UNEP, 2009, 2020) con un 61% y con un 15% soCA + RESPONSE (Eisfeldt, 2017; UFZ, 2021). El 15% solo utiliza dos métodos y 8 es la cantidad de indicadores en promedio utilizados por estudio.

En resumen, la revisión bibliográfica revela que la mayoría de los estudios se enfocan en evaluar el impacto ambiental desde la producción (*cradle*) hasta el punto de uso (*gate*), con solo una minoría considerando el ciclo completo del producto hasta su disposición final.

En términos de métodos utilizados para cuantificar estos impactos, se observa una diversidad, siendo el método CML el más comúnmente aplicado en el análisis ambiental. En el ámbito económico, el método presentado por IPCC, (2006a) es el más predominante, seguido de cerca por otros enfoques como AspenTech, (2013) y soCA + RESPONSE (Eisfeldt, 2017; UFZ, 2021). En cuanto al análisis social, se destaca el uso de las “Directrices para la evaluación del ciclo de vida social de los productos” (UNEP, 2009, 2020).

Los principales métodos de interpretación de resultados de las tres áreas son primero el análisis de decisiones de multicriterio, luego la combinación de resultados mediante método de puntuación, y finalmente el triángulo de sostenibilidad.

Lo comentado anteriormente sugiere una tendencia hacia una evaluación más profunda del impacto ambiental, con una consideración creciente de factores económicos y sociales. Sin embargo, también señalan la necesidad de una mayor estandarización y coherencia en los métodos utilizados para garantizar la

comparabilidad y la fiabilidad de los resultados. La temática de los análisis de sostenibilidad es amplia, sin embargo, se destacan especialmente los estudios relacionados con biocombustibles y producción de carne. Se debe mencionar que se observa una notable falta de evaluaciones de ASCV en la producción de frutas, así como en la evaluación de la producción e implementación de nuevas tecnologías.

## 3.6 Otros marcos metodológicos para el análisis de sostenibilidad: Análisis Input-Output

El ACV Input-Output (IO) consiste en integrar indicadores en un marco Input-Output, mediante las tablas simétricas IO que describen las relaciones económicas entre los sectores de la economía de una región. Este enfoque proporciona un análisis a nivel meso o macro económico, en un formato contable, mostrando los flujos monetarios desde los sectores que utilizan bienes y servicios hasta los sectores que los suministran y consumen, considerando todos los impactos indirectos en la cadena de valor del ciclo de vida (Miller & Blair, 2009).

El ACV multirregional Input-Output (en inglés, MRIOA), es un enfoque económico que rastrea los flujos financieros entre los principales sectores económicos de diferentes países. Este enfoque se puede ampliar, desde el análisis de flujos financieros, para estimar flujos de recursos al incorporar datos de las Cuentas Nacionales de Huella, Biocapacidad y sociales ocultos e indirectos asociados con el consumo aguas abajo (downstream) (Miller & Blair, 2009). Los datos basados en MRIO permiten rastrear flujos detallados de recursos entre los principales sectores económicos de los países, lo que facilita la desagregación de los datos nacionales de Huella en componentes más específicos relacionados con el consumo y la industria (Kitzes, 2013).

El ACV de Input-Output ambientalmente extendido (en inglés, Environmental Extended Input Output Analysis (EEIO ACV)) proporciona un método simple y robusto para evaluar las relaciones entre las actividades de consumo económico y los impactos ambientales, incluyendo la extracción y degradación de los recursos naturales (Murray & Wood, 2010).

### 3.6.1 Metodología

El EEIOA utiliza tablas de Input-Output (en inglés, IOT) con conjuntos de datos adicionales para modelar los impactos medioambientales o sociales (Miller & Blair, 2009). Las IOT por sí solas solo ofrecen una visión general del tamaño y la estructura de la economía, y sus impactos económicos.

En la Tabla 3.15. se presenta una IOT a modo de ejemplo que explica las relaciones macroeconómicas de una economía en un formato contable, trazando los flujos monetarios desde los sectores que utilizaron los bienes y servicios a los sectores que los suministraron y viceversa. Las IOT son matrices de números con filas de inputs (j) y columnas (i) que corresponden con los sectores de la economía.

Tabla 3.15. Esquema de una tabla IO (adaptado de Lenzen, 2000)

		Sector primario	Demanda intermedia Sector secundario	Sector terciario	Demanda final
		Agricultura Minería Pesca Silvicultura	Construcción Plásticos Acero Automotriz	Comercio Banca Hostelería Desechos	Hogar
Inputs intermedios	Sector Primario	Bienes y servicio	Sectores intermedios $T_{ij}$		Demanda final
	Sector secundario				
	Sector terciario				
Inputs primarios		Hogar Gobierno Capital Importaciones	$V$ Inputs primarios para producción		Inputs primarios para la demanda final
Parte Ambiental		Desechos 1 Desechos n	$e$ Impactos ambientales Generados por sectores intermedios		
		Gasto total $(X')$			Ventas totales/ Output $(X)$

Los sectores intermedios, que son los sectores de la economía que producen bienes y servicios, están registrados en ambos ejes permitiendo la intersección entre ellos, siendo  $T$  los inputs (insumos) de los sectores intermedios y  $V$  los inputs primarios de sectores exógenos a la economía y que, por lo tanto, no pueden rastrearse a través de ésta. La demanda final,  $F$ , es el consumo de bienes o servicios en su forma final por parte de los hogares, el gobierno, las exportaciones, etc.

Se asume que para que una IOT refleje la economía, el producto bruto o las Ventas Totales,  $X$ , al ser transpuestas, deben ser iguales al Gasto Total,  $X'$ . Esto implica que las sumas de las columnas de  $X' = V + T_{j,i}$  deben ser iguales a las sumas de las filas  $T_{i,j} + F_i = X$ . Al dividir cada celda de  $T$  por los sectores correspondientes de  $X$ , se obtiene la matriz de coeficientes técnicos o matriz de coeficientes de requisitos por unidad de producción  $A = T \cdot \hat{x}_1^{-1}$ , donde el símbolo '^' sobre un vector denota una matriz diagonal (elementos del vector en la diagonal principal y ceros en el resto de posiciones), por ejemplo,  $X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$  entonces  $\hat{X} = \begin{bmatrix} x_1 & 0 \\ 0 & x_2 \end{bmatrix}$ . Los coeficientes de requisitos directos de la matriz entregan la proporción directa de cada insumo necesario para crear una unidad de producción o procedimiento para cada tipo de producción (Kitzes, 2013). A partir de  $A$ , el sistema económico como se

muestra en la IOT se puede representar por  $\mathbf{X} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{F}$ . Al despejar esta ecuación para  $\mathbf{X}$ , se obtiene la Ecuación 3.2., en la que  $\mathbf{I}$  es la matriz identidad (elemento neutro) y  $\mathbf{F}$  es el vector de demanda final.

$$\mathbf{X} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{F}$$

Ecuación 3.2. Matriz inversa de Leontief (Leontief, 1970)

En la Ecuación 3.2. la matriz  $(\mathbf{I}-\mathbf{A})$  se denomina matriz de Leontief o matriz de coeficientes de requisitos totales (directos e indirectos) por unidad de demanda final (Miller & Blair, 2009), y permite la determinación de un procedimiento de producción cuando se especifica una demanda final exógena.

Las IOT se suelen discutir en términos de precio básico (costo para el productor de producir el producto). Sin embargo, se debe considerar que las IOT no son simplemente tablas bidimensionales planas, sino que son tablas que se superponen para abarcar diferentes efectos económicos. Además de la tabla de precios básicos, pueden existir IOT para los costos de subsidios, impuestos, comercio y transporte. Al sumar estas tablas, se obtiene el precio de compra total.

El EEIOA no solo captura los efectos económicos o ambientales directos de producir un producto, sino también los efectos aguas arriba, a lo largo del proceso de producción. Cada producto tiene diversas capas de producción preliminares, y a su vez, estas capas tienen sus propias capas de producción preliminares. Independientemente de la composición exacta de las capas de producción, todas conducen a la población para el consumo.

Algunas formas de evaluación de impacto ambiental solo tienen en cuenta la primera (y posiblemente la segunda y tercera) capa de producción, ignorando muchos de los impactos aguas arriba. Este error de truncamiento puede significar que hasta el 50% de los efectos ambientales no se contabilizan (Leontief, 1970). Pero la fortaleza del EEIOA radica en que puede capturar las interrelaciones entre varias capas de producción y atribuir, de manera simple y consistente, los impactos ambientales totales de la producción.

En la Tabla 3.15. la última fila corresponde al vector  $\mathbf{e}$  que es el vector de la cantidad de impactos ambientales por sector  $i$ . A partir de esto, se puede crear un vínculo entre la actividad económica y el impacto ambiental, es decir, la cantidad de contaminación emitida por unidad (monetaria) de producción del sector

$\mathbf{i}$ ,  $\mathbf{g}_i = \mathbf{e}_i / \mathbf{x}_i$ . Lo que se conoce como el multiplicador de intensidad directa o el coeficiente directo de 'contaminación', porque representa la cantidad de contaminación correspondiente a \$1 de gasto en el sector  $i$ . En la primera capa de

$\mathbf{e}$ , ( $\mathbf{e}_1$ ), un dólar de producto se relaciona únicamente con la contaminación directamente emitida, de modo que  $\mathbf{e}_1 = \mathbf{g} \cdot \mathbf{I}$ . En la segunda capa ( $\mathbf{e}_2$ ), se involucra el primer nivel de la cadena de suministro,  $\mathbf{A}$ . Por lo tanto,  $\mathbf{e}_2 = \mathbf{g} \cdot \mathbf{A}$ , mientras que  $\mathbf{e}_3 = \mathbf{g} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{A}$  es el tercer nivel de impactos ambientales asociados con \$1 de producción de la economía (Lenzen, 2000; Majeau-Bettez et al., 2011). En la Figura 3.38. se representa gráficamente la composición de la contribución multirregional de los impactos asociados al consumo de un producto. Los datos que utiliza EEIOA provienen de la base de datos Exiobase, que entrega información de la contribución de los distintos sectores en distintas regiones, como se presenta en la Figura 3.39.

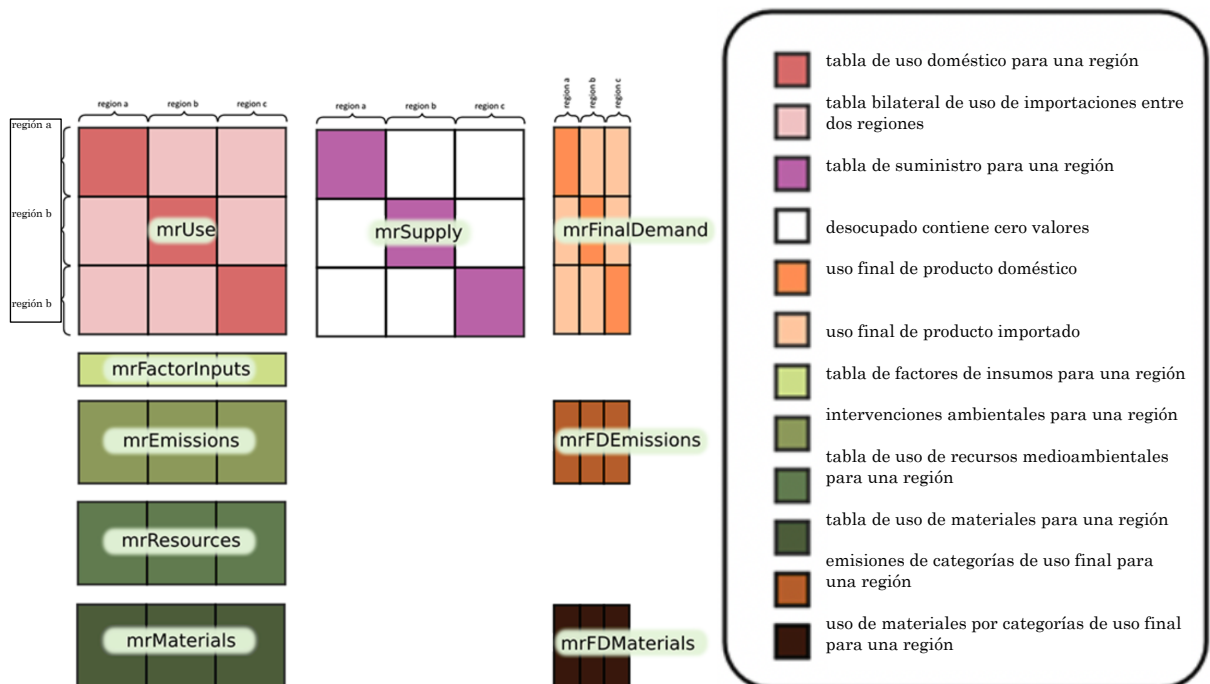


Figura 3.38. Esquema de uso de la tabla Input-Output multirregional ampliada ambientalmente (adaptado de EXIOBASE, 2015)

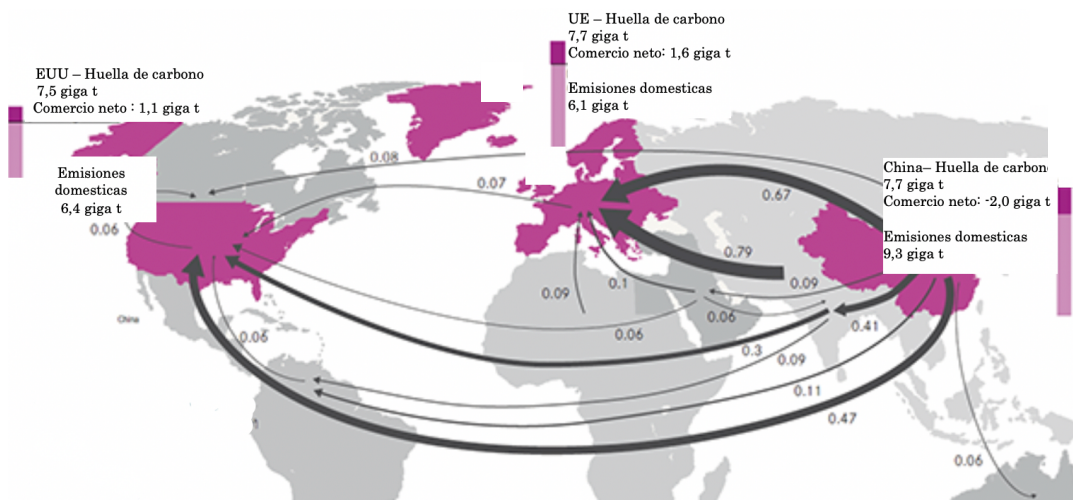


Figura 3.39. Impactos medioambientales globales (huella de carbono) asociados al consumo final de los grupos de producto (adaptado de EXIOBASE, 2015)

### 3.6.2 Metodología EEIOA en el sector agroalimentario.

A continuación se presenta la revisión bibliográfica realizada bajo la búsqueda según las palabras clave “Input-output; fruit; agriculture; IOA; MRIO; EEIOA” en WOS y SCOPUS, que ha permitido identificar 10 artículos relevantes en revistas científicas (ver Tabla 3.16.).

Tabla 3.16. Revisión bibliográfica de análisis Insumo-Producto ambientalmente extendido (EEIOA) en el sector agroindustrial

N.º	Referencia	Tema	Alcance	Método/modelo - base de datos	N.º categorías de análisis	País
1	(Kitzes, 2013)	Cadenas mundiales de suministro de la industria alimentaria	<i>“Cradle to grave”</i>	World Input Output Database (WIOD) - Food and Agriculture Organization Corporate Statistical, UN Commodity Trade Statistics y Global Trade Analysis Project (GTAP) database.	2 (Impacto hídrico directo e indirecto).	España
2	(Duarte et al., 2014)	Comercio europeo	<i>“Cradle to grave”</i>	EEIOA – EXIOBASE 3	14 (Cambio climático, Material particulado, uso del agua, uso del suelo, acidificación, eutrofización y 7 más)	Unión Europea
3	(Beylot et al., 2020)	Consumo semanal de alimentos en hogares	<i>“Cradle to gate”</i>	EEIOA -Australia IOT y Encuestas	4 (Uso de agua y energía, CO <sub>2</sub> y materiales a desecho)	Australia

N.º	Referencia	Tema	Alcance	Método/modelo - base de datos	N.º categorías de análisis	País
4	(Reynolds et al., 2015)	Sistema alimentario	<i>“Cradle to grave”</i>	EEIOA – EXIOBASE 3.6	2 (Uso neto de energía y origen de la fuente de energía)	Mundial
5	(Usubiaga-Liaño et al., 2020)	Consumo en la Unión Europea	<i>“Cradle to grave”</i>	EEIOA – CEDA EU25 (Comprehensive Environmental Data Archive)	8 (Agotamiento abiótico, calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono y 5 más)	Unión Europea
6	(Huppel et al., 2006)	Producción de aceite de palma	<i>“Cradle to gate”</i>	MRIO – EXIOBASE, FAOSTAT y BACI (en inglés, Benefits of Action or Cost of Inaction)	2 (Huella de uso del suelo y huella de biodiversidad)	Mundial
7	(Többen et al., 2018)	Efectos de la agricultura sueca	<i>“Cradle to grave”</i>	Input-Output Analysis (IOA) – Eurostat y Bases de datos de estadísticas	14 (Recursos no renovables, uso de energía, calentamiento global, calidad del aire, toxicidad y 7 más)	Suecia
8	(Engström et al., 2006)	Recuperación de suelos	<i>“Cradle to grave”</i>	IOA y MRIO – base de datos de emisiones CO <sub>2</sub> por ciudades	2 (Emisiones directas e indirectas de gases efecto invernadero)	China

N.º	Referencia	Tema	Alcance	Método/modelo - base de datos	N.º categorías de análisis	País
9	(Xu et al., 2024)	Cadena alimentaria	<i>“Cradle to grave”</i>	EEIOA – E3IOT EU25 Database	2 (Emisiones de CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O, e impacto económico GHG)	Unión Europea
10	(Camanzi et al., 2017)	Producción y consumo de productos agroalimentarios	<i>“Cradle to gate”</i>	MRIO – World Resources Institute, Aquastat, EXIOBASE, FAOSTAT, EORA y GTAP bases de datos	3 (Estrés hídrico de países consumidores y productores, oportunidad de reducción de estrés hídrico)	Mundial

En los artículos encontrados se incluyen diversos temas dentro del sector agroalimentario, destacando principalmente los estudios que analizan el impacto ambiental de la cadena alimentaria, el comercio y el consumo relacionados con la producción agroalimentaria (40%).

Respecto al alcance de los estudios, los autores seleccionaron principalmente el alcance de "cradle to grave" con un 70%, mientras que un 30% utiliza "cradle to gate", mostrando un interés predominante en evaluar el impacto ambiental desde la obtención de materias primas, pasando por la producción, hasta el fin de vida del producto o sistema analizado.

Los modelos más utilizados fueron EEIOA con un 40%, y MRIOA e IOA en un 20% respectivamente. Cabe mencionar que todos los modelos presentados en los artículos citan los principios propuestos por (Shaikh et al., 2022) y la matriz inversa.

En cuanto al origen de los datos, éstos proceden de bases de datos, encuestas y estadísticas, siendo el recurso de las bases de datos el más utilizado en los artículos, con un 40% de preferencia por EXIOBASE, seguido por FAOSTAT, GTAP y EUROSTAT con un 20% respectivamente.

Respecto al número de categorías de análisis elegidas, el promedio por artículo es de cinco. Las categorías de calentamiento global, uso del agua, uso de energía, acidificación y eutrofización son las más evaluadas.

No hay presencia de estudios que evalúen un escenario de innovación tecnológica en el sector agroalimentario o específicamente en la producción de fruta de hueso. Solo el artículo de Shaikh et al. (2022), presenta un indicador de oportunidad de disminución del estrés hídrico, formulado mediante una serie de medidas de conversión y mecanismos de apoyo asociados con la innovación para mejorar la eficiencia del uso del agua en la producción y consumo de productos agrícolas. En cuanto a la capacidad de la metodología para analizar el impacto ambiental, no existen estudios que evalúen la precisión de sus resultados en comparación con la metodología de Análisis de de Ciclo de Vida ambiental, que es específica en este ámbito y lleva un desarrollo mas extenso en diversas areas.

## 4 Resultados

El capítulo de resultados está compuesto por cuatro secciones (subcapítulos), cada una de las cuales presenta una evaluación y un análisis que integra diversas metodologías, alcances y fuentes de datos de inventarios en el sector agroindustrial. Siendo el objetivo el análisis de los potenciales impactos ambientales, económicos y sociales a lo largo de las distintas etapas del ciclo de vida del sector productivo de fruta en España, con un enfoque particular en la fruta de hueso. Este análisis integral permitirá identificar los procesos que generan los impactos más significativos en las diferentes áreas de la sostenibilidad del sector, proporcionando una base sólida para plantear estrategias de perfeccionamiento en cada área.

Como ya se ha mencionado, la composición del capítulo 4 de resultados se desarrolla en torno a cuatro estudios que están interrelacionados y centrados en el ACV siguiendo las normas ISO 14040-14044:2006, que proponen cuatro etapas iterativas: 1) Definición de objetivos y alcance, 2) Análisis de inventario del ciclo de vida, 3) Evaluación de impacto del ciclo de vida, y 4) Interpretación del ciclo de vida.

Para cada uno de los trabajos resultantes de esta tesis, estas cuatro etapas se describen de manera general, en cada uno de estos estudios, las dos primeras etapas del ACV, “Definición del alcance y objetivo” y “Análisis del inventario del ciclo de vida”, corresponden a la sección de Materiales y Métodos, mientras que los apartados “Evaluación del impacto” y la etapa de “Interpretación” equivalen a la sección de Resultados y Discusión. Además, se incluyen las conclusiones específicas por estudio.

## **4.1 La huella de carbono de la producción de fruta de hueso: Comparación entre el análisis del ciclo de vida (ACV) y el análisis de Input-Output ambientalmente extendido (EEIOA)**

En esta primera parte del capítulo se lleva a cabo una evaluación del ACV-A (huella ambiental) y económico de la producción de fruta de hueso, específicamente la nectarina. Este análisis abarca desde la producción de los insumos hasta el fin de vida de los desechos generados en el sistema, con el objetivo de identificar preliminarmente las etapas, subetapas y procesos con mayor contribución a los impactos, como base para un análisis más detallado.

Los datos utilizados provienen de una empresa frutícola ubicada en la región de Murcia (Abarán), donde se llevan a cabo actividades como producción (técnicas de agricultura convencional), cosecha, selección, preparación y empaque de la fruta (ver Anexo D). Se consideró un escenario tipo que incluye la distribución, comercialización, consumo y fin de vida en la comunidad de Madrid, teniendo en cuenta factores como distancias, transporte, precios y manejo de residuos.

El análisis del fin de vida incluye el reciclaje del empaque y los residuos vegetales, mientras que los desechos restantes se someten a incineración (con recuperación energética) y disposición final en vertederos. Para esta evaluación se utilizó el método de ACV de procesos en combinación con el ACV de Input-Output ambientalmente extendido, con el objetivo de comparar sus resultados y evaluar la veracidad de los resultados del EEIOA como método alternativo para la evaluación de impactos.

### **4.1.1 Materiales y métodos**

El análisis ambiental se ha llevado a cabo mediante un enfoque de ciclo de vida que sigue la norma ISO 14040;14044:2006, donde se identifican cuatro etapas: Definición del objetivo y alcance; Inventario del ciclo de vida (ICV); Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV); e Interpretación. Las siguientes subsecciones ofrecen información detallada sobre las decisiones metodológicas y los supuestos aplicados en estas etapas.

#### **4.1.1.1 Definición del objetivo**

El objetivo principal del estudio es cuantificar la huella de carbono de la producción de fruta de hueso en el sureste español utilizando dos enfoques

metodológicos: el método ACV-A y el método econométrico EEIOA. La validación del método econométrico EEIOA en este contexto tiene como objetivo demostrar su utilidad y precisión en comparación con el ACV, facilitando su aplicación en la evaluación de la sostenibilidad de los productos agrícolas. Se proponen los siguientes objetivos secundarios: i) recopilar y evaluar inventarios detallados del ciclo de vida material-energético y económico aplicables a las metodologías ACV y EEIOA; ii) analizar y comparar la HC de las etapas del ciclo de vida obtenida mediante ambas metodologías; e iii) interpretar y elaborar conclusiones sobre la competencia y aplicabilidad de cada uno de estos métodos.

#### 4.1.1.2 Definición del alcance

i. Estructura metodológica. La estructura de procesos unitarios se realiza siguiendo las directrices para productos alimentarios descritos en las Reglas de Categoría de Producto (RCP) "UN CPC 013 para frutas y frutos secos" (EPD, 2019a) y la metodología de la Huella Ambiental de producto (Zampori & Pant, 2019).

ii. Descripción de sistema. El producto objeto de estudio es la nectarina (*Prunus persica* var. nectarina) cultivada por una empresa frutícola situada en el sureste español (Abarán, región de Murcia). Los datos describen la media de 15 campañas para una parcela de 405 ha, con una densidad de 667 plantas por ha y una producción de 35 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de fruta fresca. El producto se cultiva, prepara, selecciona y envasa para su comercialización en España como fruta fresca.

iii. Unidad funcional (UF). Se define como 1 kg de fruta lista para el consumo, considerando todo el ciclo de vida (incluido su envase, pero no su peso en la UF) (EPD, 2019a).

iv. Estructura de sistema y límites.

La Figura 4.1. describe la estructura y los límites del sistema considerado en el ACV de la nectarina (ACV y EEIOA). El sistema se estructuró en tres etapas denominadas Aguas arriba (*upstream*), central (*core*) y aguas abajo (*downstream*) de acuerdo con (EPD, 2019a). La etapa aguas arriba incluye los procesos relacionados con la producción y el transporte de insumos a la parcela agrícola y/o a la planta de procesamiento de fruta, así como el establecimiento del cultivo. La etapa central se refiere a los procesos que tienen lugar durante la producción del cultivo y en la planta de procesamiento o confección de la fruta. La etapa aguas abajo se refiere a los procesos que ocurren más allá de las puertas de la fábrica (de la puerta

a la tumba), incluida la distribución, la venta al por mayor, el consumo y el final de la vida útil de los envases y los desechos de la fruta.

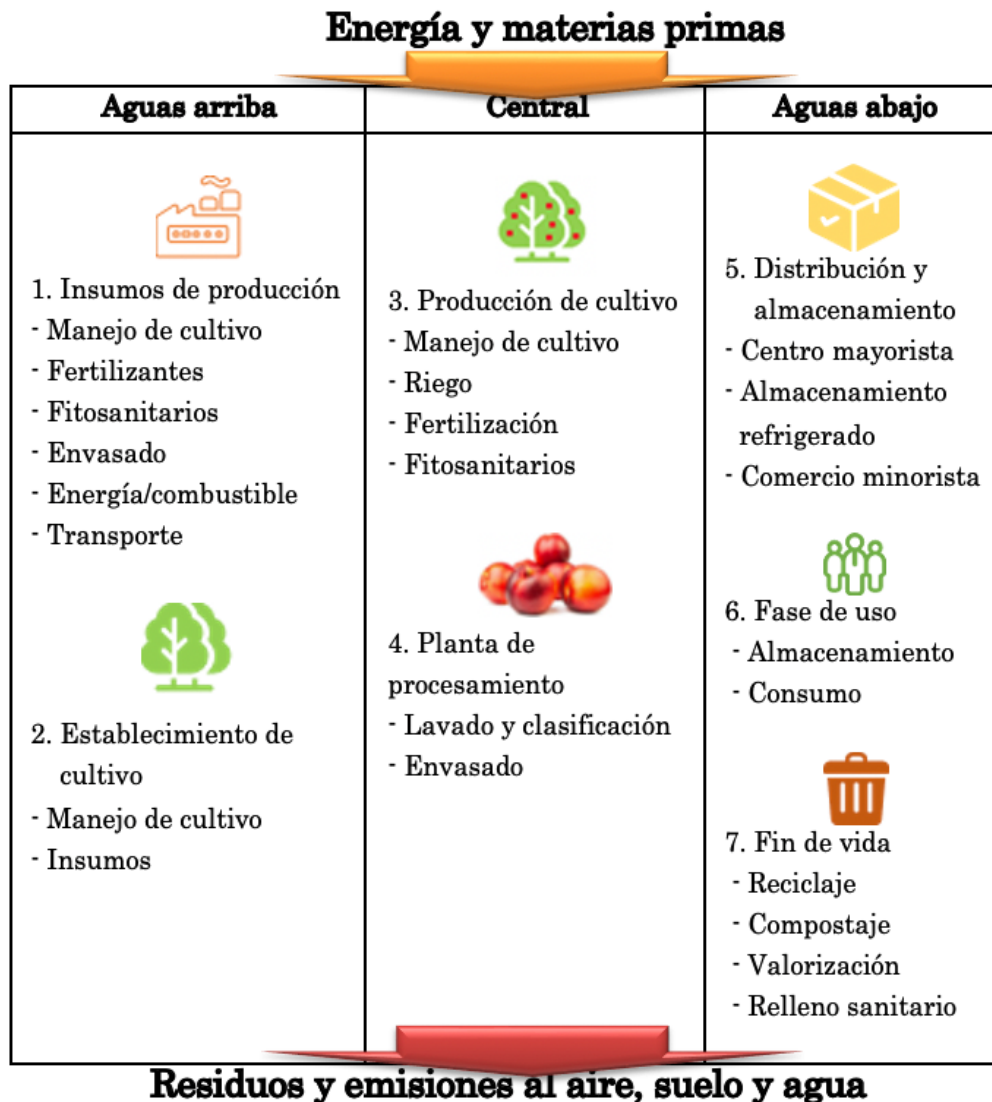


Figura 4.1. Diagrama del ciclo de vida que describe la estructura, los procesos y los límites del sistema de producción de nectarina

#### 4.1.1.3 Inventario de ciclo de vida

A continuación, se describen los datos de los inventarios primarios (“foreground”) y secundarios (“background”), así como las decisiones metodológicas consideradas para elaborar los inventarios de materiales, energía y económico del ciclo de vida de la nectarina.

Los datos primarios provenientes de una empresa frutícola para el inventario material-energético incluían el rendimiento de los cultivos y el consumo de insumos (por ejemplo, combustible para maquinaria y transporte, fertilización, tratamiento fitosanitario, riego y envasado). Los datos secundarios para productos y procesos

específicos proceden de la base de datos ecoinvent v.3.7. (Ecoinvent, 2020). El inventario económico se basa en la estructura de costes de la producción de fruta de hueso reportada por García García, (2019). Los datos del inventario se estructuran en las tres etapas indicadas (aguas arriba, central y aguas abajo), de forma que para el análisis de los procesos genéricos se asumieron las siguientes premisas:

i. Inventario material-energético aguas arriba (ver Tabla 4.1.)

- Producción de insumos (1): Esta subetapa incluye la producción de los insumos necesarios a lo largo del ciclo de vida. Se consideran los siguientes insumos: fertilizantes, fitosanitarios, sistema de riego, plántones y materiales de embalaje (madera, cartón y polietileno de baja densidad), y energía y combustible para el transporte (se consideran 800 km de camión de carga Euro4 25 t para un escenario de larga distancia en el territorio español).

- Establecimiento del cultivo (2): Esta subetapa incluye el proceso asociado al establecimiento del cultivo, que considera la preparación del suelo, la instalación del sistema de riego y conducción, la plantación y el manejo del cultivo (fertilización, fitosanitarios, riego y poda). También se contempla el uso de gasóleo para la maquinaria y el transporte (camión de 30 km Euro4 25 t se consideran para un escenario de corta distancia en el territorio) y de electricidad (mix eléctrico español de media tensión del año 2021) para el riego. Los insumos utilizados y los procesos llevados a cabo en los 3 años de duración de esta subetapa se prorratean a lo largo de los 15 años de duración de la subetapa de producción del cultivo.

ii. Inventario económico aguas arriba (ver Tabla 4.1.)

- Producción de insumos (1): Los costes de esta subetapa incluyen la infraestructura de cultivo compuesta por la caseta de aperos, el sistema de riego y el depósito de agua. El apartado de material auxiliar se compone de tijeras de podar, cestas, azadas y herramientas ligeras. Las compras incluyen fertilizantes, productos fitosanitarios y herbicidas. Los costes de los materiales de embalaje, como contenedores de polietileno, madera para palés, cajas de cartón, papel Kraft y film de plástico, se obtuvieron de las tarifas que figuran en la página web del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2020). Los costes de transporte de los insumos se obtuvieron del observatorio de costes del transporte por carretera del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA, 2021).

Tabla 4.1. Inventarios material-energéticos y económicos de la producción de nectarina por unidad funcional (1 kg de fruto) en la etapa de aguas arriba. El porcentaje representa el aporte total por etapa y subetapa. p: abreviatura de piezas en inglés

Etapa ciclo de vida	Inventario material-energía		Inventario económico (€)	
	Unidad	Cantidad		
Aguas arriba			1.0E-01	14.21%
1. Producción de insumos			6.1E-02	8.59%
Infraestructura de cultivo	p	2.0E-07	1.4E-02	1.99%
Sistema de riego	p	3.1E-04	1.5E-02	2.13%
Fitosanitarios	kg	5.1E-02	1.4E-02	2.02%
Fertilizantes	kg	1.1E-01	5.3E-04	0.07%
Materiales auxiliares	kg	3.0E-02	3.0E-03	0.41%
2. Establecimiento de cultivos			4.0E-02	5.63%
Preparación y plantación	ha	1.9E-06	8.1E-03	1.13%
Riego	m <sup>3</sup>	8.6E-03	3.2E-02	4.50%
Gestión de cultivos	ha	2.9E-05	-	-
Fitosanitarios	kg	5.9E-10	-	-
Fertilización	kg	3.2E-03	-	-
Electricidad	kWh	2.4E-03	-	-
Transporte	tkm	2.5E-04	2.4E-05	0.00%

- Establecimiento del cultivo (2): El coste de esta subetapa incluye el establecimiento del cultivo, que comprende la preparación del terreno, la plantación y el coste del agua. Además, se incluyen los costes de transporte por carretera del MITMA, (2021).

iii. Inventario material-energético central (ver Tabla 4.2.)

- Producción de cultivo (3): Esta subetapa incluye el riego (el agua y la electricidad para los sistemas de bombeo y control) y la fertilización (incluidos los insumos y la maquinaria y el combustible para su aplicación), los fitosanitarios (incluidos los insumos para los cultivos, la maquinaria y el combustible para su aplicación) y la gestión de los cultivos (incluida la preparación del suelo, la poda, el aclareo, la cosecha y el uso de maquinaria y combustible). También se considera el consumo de combustible para la maquinaria y el transporte (camión de carga de 30 km Euro4 35 t para un escenario de corta distancia en el territorio) y de electricidad (mix eléctrico español de media tensión del año 2021).

- Planta de procesamiento (4): Esta subetapa incluye el uso de gasóleo y el transporte (30 km camión de carga Euro4 25 t para un escenario de corta distancia en el territorio) de la fruta desde la parcela agrícola hasta la planta de procesamiento donde la fruta se procesa en las siguientes etapas: pre-refrigeración; pre-calibrado; limpieza; cepillado; lavado; secado; selección; calibración; envasado; almacenamiento en frío y refrigeración. El envasado considera la disposición de la fruta (3,5 kg) sobre una base de polietileno de baja densidad en una caja de cartón, ubicadas una sobre otra en un pallet de madera envuelto en film para despacho a comercio mayorista. También se considera el uso de electricidad (mix eléctrico español de media tensión del año 2021) para el funcionamiento de las máquinas en las etapas de procesamiento de la fruta y el almacenamiento en las cámaras frío, y el uso de agua para el lavado (tratamiento de agua del grifo y distribución-tratamiento de aguas residuales del alcantarillado).

iv. Inventario económico central (ver Tabla 4.2.)

- Producción de cultivo (3): El coste de esta subetapa incluye tareas manuales como la poda anual, el aclareo y la recolección, los seguros de la producción agrícola, los costes de maquinaria y mano de obra, el mantenimiento de los activos fijos y la electricidad utilizada para el riego. Se considera un coste de personal de 6,56 €/h, que corresponderían a las horas de trabajo que se requieren en una ha por año dividido por la cantidad de kg cosechados. Además, se incluyen los costes de transporte de la fruta por carretera desde la parcela agrícola hasta la planta de procesadora (MITMA, 2021).

- Planta de procesamiento (4): Los costes de esta subetapa están asociados al consumo eléctrico de los equipos de preparación, selección y envasado de la fruta, que son de 0,1199 €/kWh (REE, 2021). Además, se considera el coste del uso del agua en el tratamiento y distribución, de 1,12 €/m<sup>3</sup> y el alcantarillado y tratamiento de aguas residuales, de 0,34 €/m<sup>3</sup> (HIDROGEA, 2021) y, por último, el coste de los servicios prestados por los trabajadores en la planta (6,56 €/h) (BOE, 2021a).

v. Inventario material-energético aguas abajo (ver Tabla 4.3.)

- Distribución y almacenamiento (5): Esta subetapa incluye el uso de gasóleo y el transporte refrigerado (800 km camión de carga Euro4 16 t para un escenario de larga distancia en el territorio) desde la planta de procesamiento hasta la planta de distribución de fruta para mayoristas. Se considera un camión de carga de 30 km con máquina frigorífica Euro4 7,5 t para un escenario de corta distancia en el territorio desde el centro de distribución al comercio minorista. La fruta envasada,

como se ha indicado, se conserva en cámara frigorífica (2000 m<sup>3</sup>) durante un periodo máximo de 3 semanas en el centro de distribución, teniéndose en cuenta el consumo de electricidad de los equipos de refrigeración mecánica de la planta. También se tiene en cuenta el almacenamiento de corta duración (3 días) en cámaras de refrigeración (50 m<sup>3</sup>) del comercio minorista (mix eléctrico español de media tensión del año 2021).

Tabla 4.2. Inventario material-energético y económico de la producción de nectarina por unidad funcional (1 kg de fruto) en la etapa central. El porcentaje representa la contribución total por etapa y subetapa. p: abreviatura de piezas en inglés

Etapa ciclo de vida	Inventario material-energético		Inventario económico (€)	
	Unidad	Cantidad		
Central			5,00E-01	69,87%
3. Producción de cultivos			3,90E-01	54,52%
Riego	m <sup>3</sup>	1,29E-01	-	-
Seguro de cultivos	ha	8,58E-05	7,10E-02	9,98%
Gestión de cultivos	kg	3,10E-04	2,50E-01	35,07%
Fitosanitarios	kg	4,81E-02	-	-
Fertilización	kg	4,81E-02	-	-
Maquinaria	p	2,86E-07	1,60E-02	2,30%
Mantenimiento			3,00E-03	0,42%
Electricidad	kWh	3,60E-02	3,60E-03	0,50%
Personal	-	-	4,50E-02	6,23%
Transporte	tkm	1,47E-03	1,40E-04	0,02%
4. Planta de procesamiento			1,10E-01	15,35%
Uso de agua	m <sup>3</sup>	1,30E-04	7,40E-04	0,10%
Alcantarillado	m <sup>3</sup>	1,10E-04	1,20E-05	0,00%
Trabajadores	-	-	1,10E-01	14,82%
Electricidad	kWh	2,62E-02	3,00E-03	0,42%

- Fase de uso (6): Esta subetapa considera el consumo de electricidad para la refrigeración de la fruta en el hogar, 5 días en nevera estándar (0,67 KWh/día) (mix eléctrico español de media tensión del año 2021) y de agua para el lavado (producción de agua de grifo y tratamiento de aguas residuales).

Tabla 4.3. Inventario material-energético y económico de nectarinas por unidad funcional (1 kg de fruta) en la etapa de aguas abajo. El porcentaje representa el aporte total por etapa y subetapa

Etapa del ciclo de vida	Inventario material-energía		Inventario económico (€)	
	Unidad	Cantidad		
Aguas abajo			1,14E-01	15,92%
5. Distribución y almacenamiento			4,75E-02	6,65%
Transporte	tkm	4,20E-01	1,34E-03	0,19%
Refrigeración eléctrica	kWh	4,30E-01	4,62E-02	6,46%
6. Uso			9,37E-03	1,30%
Electricidad	kWh	7,90E-02	9,37E-03	1,30%
Uso de agua	m <sup>3</sup>	2,60E-04	2,13E-04	0,03%
Desperdicio de agua	m <sup>3</sup>	2,60E-04	6,10E-05	0,01%
7.1. Fin de vida de residuos de comida			1,17E-02	1,64%
Transporte	tkm	5,10E-03	1,17E-02	1,64%
Compostaje	kg	1,20E-01	4,05E-03	0,57%
Recuperación energética	kg	3,40E-02	9,58E-04	0,13%
Vertedero	kg	1,70E-02	6,19E-03	0,87%
7.2. Fin de vida de residuos de empaque			4,53E-02	6,36%
Transporte	tkm	2,98E-03	4,53E-02	6,36%
Recuperación energética	kg	1,20E-03	1,06E-02	1,49%
Reciclaje	kg	3,60E-03	-	-
Vertedero	kg	7,00E-03	3,44E-02	4,82%

- Fin de vida útil (7): Esta subetapa considera el fin de vida útil de la fruta y de los envases. Los distintos residuos se transportan al centro de transformación (20 km Camión 16 t EURO4 para un transporte de corta distancia). Los residuos de nectarina se destinan a compost. En referencia a los materiales de embalaje, la madera del palé es reciclable en un 15%, se valoriza energéticamente en un 12% y el 73% va a vertedero. El cartón es reciclable en un 60%, el 12% es valorizado energéticamente y el 28% va a vertedero. El plástico es reciclable en un 22,5%, se valoriza energéticamente en un 12% y se destina a vertedero en un 65,5% (RETEMA, 2020).

## vi. Inventario económico aguas abajo (Tabla 4.3.)

- Distribución y almacenamiento (5): Los costes de transporte de esta subetapa proceden del observatorio español de costes de transporte por carretera (MITMA, 2021). Esta subetapa también incluye los costes de la electricidad para las operaciones de almacenamiento (0,11 €/kWh) (REE, 2021).
- Fase de uso (6): Los costes de esta subetapa están asociados al consumo de electricidad para la conservación doméstica (0,11 €/kWh) (REE, 2021), el uso de agua para el lavado del producto antes de ser consumido (0,81 €/m<sup>3</sup>) y al tratamiento de aguas residuales (0,23 €/m<sup>3</sup>) (Canal Isabel II, 2021).
- Fin de vida (7): Los costos económicos de las actividades de fin de vida se obtuvieron utilizando el mix de gestión de residuos para frutas y envases de una ciudad europea y el costo económico correspondiente a cada una de estas actividades (Rama et al., 2021).

**4.1.1.4 Método del análisis de impacto de ciclo de vida**

## i. Análisis de ciclo de vida

La evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) utilizada en este ACV, utiliza el método Environmental Footprint (EF) v.3.0 (Fazio et al., 2018), como sugiere la Comisión Europea en sus directrices sobre la huella ambiental de los productos (PEF) (Zampori & Pant, 2019). La modelización y los cálculos para el ACV se realizaron utilizando el software SimaPro v.9.2. (Goedkoop et al., 2016) y PESTLCI para simular las emisiones fitosanitarias (Dijkman et al., 2012).

## ii. Análisis input-output extendido medioambientalmente

El EEIOA se realiza utilizando la base de datos EXIOBASE 3.4 (Wood et al., 2015) que incluye tablas input-output de 49 regiones (28 de la Unión Europea, 16 grandes economías y 5 del resto del mundo) y 163 sectores económicos (UNEP, 2016). Los cálculos del EEIOA se realizaron utilizando el software Matlab (MathWorks, 2021). Los impactos directos e indirectos se expresan como el impacto ambiental total por UF producida (kg CO<sub>2</sub> eq UF).

**4.1.1.5 Análisis de incertidumbre**

Las principales fuentes de incertidumbre en el análisis ACV se deben a la variabilidad de los datos de inventario y a los efectos acumulativos de las imprecisiones del modelo. Los conjuntos de datos de Ecoinvent utilizados en este

estudio incluyen valores de incertidumbre específicos. La simulación Monte Carlo se utiliza para la propagación de la incertidumbre y la evaluación de la robustez de los resultados del ACV (intervalos de confianza del 95%, Método EF 3.0) (Fazio et al., 2018) para la categoría de huella de carbono.

## 4.1.2 Resultados y discusión

### 4.1.2.1 Comparación de los inventarios material-energético y económico del ciclo de vida

Esta sección proporciona un análisis comparativo de los inventarios material-energético y económico por UF descritos en las Tabla 3.2., Tabla 3.3., Tabla 3.4., necesarios para el cálculo de la HC de las nectarinas utilizando ACV y EEIOA, respectivamente.

#### i. Etapa aguas arriba

- Producción de insumos (1): El EEIOA tiene en cuenta el sistema de riego cuyos costes se incorporan a los costes de infraestructura de cultivo. El coste de los materiales auxiliares tales como herramientas para manejos de poda, aclareos y cosecha se incluyen en EEIOA. La producción de estos materiales auxiliares también se incorpora como proceso en el conjunto de datos genérico de Ecoinvent utilizado en ACV.

- Establecimiento del cultivo (2): El inventario económico para el establecimiento del cultivo (utilizado en EEIOA) incorpora información desagregada para las actividades de preparación y plantación, riego (uso de agua) y transporte. El inventario económico no incluye datos para el manejo del cultivo, fitosanitarios, fertilización y electricidad, debido a que estas actividades ya están incorporadas en la etapa de preparación y plantación.

#### ii. Etapa central

- Producción del cultivo (3): se dispone de datos de inventario económico para la poda anual, el aclareo, la recolección, el seguro de cosecha y el personal permanente. En esta subetapa se consideran los costes de la maquinaria de fertilización y de aplicación de fitosanitarios, así como los costes de mantenimiento. Se tiene en cuenta la electricidad consumida en el proceso de riego. Los costes de los fertilizantes, herbicidas y agua no se incluyen en esta etapa, sus costos de adquisición y consumo se incluyen en la etapa de aguas arriba, debido a que éstos se interpretan como insumos del ciclo de vida del cultivo en EEIOA. En ACV, se

consideran las emisiones derivadas de la aplicación de fertilizantes y productos fitosanitarios, así como el uso de maquinaria y el consumo de diésel en la gestión del cultivo. El inventario de ACV no toma en cuenta la mano de obra ni los servicios (seguros), los cuales sí están incluidos y tienen una contribución significativa en los inventarios económicos.

- Procesamiento en planta de procesamiento (4): El inventario económico para el EEIOA incluye los costes de la mano de obra, aspecto que no se tiene en cuenta en los inventarios de material-energéticos utilizados en el ACV.

### iii. Etapa aguas abajo

- Fin de vida (7): El inventario económico (para EEIOA) no tiene en cuenta el coste de las actividades de gestión de residuos de envases (reciclaje, vertido, etc.). El ACV considera el reciclaje de los materiales que se incluyen en el envasado de la fruta.

#### 4.1.2.2 Evaluación del inventario económico

La utilización de unidades monetarias permite analizar la contribución de las distintas etapas y procesos en el inventario económico (utilizado para realizar la EEIOA).

Los resultados de la Tabla 4.2. muestran que el 70% del coste del sistema de producción de nectarinas se produce en la etapa central del ciclo de vida. El manejo de cultivo es el proceso que genera la mayor contribución económica (35,9%), seguido de los costes de mano de obra en la planta procesadora (14,8%) y los seguros de producción (9,9%). La etapa aguas abajo (ver Tabla 4.3.) es la segunda que más contribuye económicamente, con un 15,9% de los costes totales. La contribución de la etapa de distribución y almacenamiento representa el 6,6% de los costes totales, seguida por el final de vida del envase (6,4%). La contribución de la etapa aguas arriba representa el 14,2% de los costes totales, incluidos los costes de producción de insumos (8,5%).

#### 4.1.2.3 Comparación del análisis de impacto del ciclo de vida

Esta sección muestra los resultados derivados de la aplicación de la metodología ACV y EEIOA a los inventarios material-energético y económico.

## i. Etapa aguas arriba

La Tabla 4.4. muestra que las emisiones totales de carbono aguas arriba calculadas mediante ACV ascendieron a 0,403 kg CO<sub>2</sub> eq por UF, lo que equivale al 44,9% del total. Las emisiones de GEI (incluyendo tanto las directas como las indirectas) calculadas mediante EEIOA fueron de 0,092 kg CO<sub>2</sub> eq por UF, correspondientes al 8,6% del total generado por el sistema de la nectarina. Tanto en el ACV como en el EEIOA, la producción de fertilizantes representa con diferencia las mayores contribuciones, con un 48,5% y un 60,9%, respectivamente. Las grandes diferencias observadas en las emisiones de GEI calculadas utilizando ACV y EEIOA pueden atribuirse principalmente a las características del sector químico utilizado para modelizar la producción de fertilizantes en EEIOA. Podría argumentarse que los fertilizantes son productos más intensivos en energía (y, en consecuencia, generan más emisiones de GEI por unidad monetaria) que la mayoría de los demás productos generados por el sector químico, tal y como se incluyen en la base de datos EXIOBASE.

Tabla 4.4. Resultados de la huella de carbono (kg CO<sub>2</sub> eq) por unidad funcional calculada con metodologías ACV y EEIOA en la etapa aguas arriba

Etapa aguas arriba	ACV	%	EEIOA	%	Emisiones directas	Emisiones indirectas
1. Producción de insumos	3,99E-01	98,8	8,01E-02	87,1	5,47E-02	2,53E-02
Infraestructura de cultivo	-	-	5,48E-03	5,98	1,03E-03	4,45E-03
Sistema de riego	1,12E-01	28,3	-	-	-	-
Fitosanitarios	7,60E-03	1,9	1,00E-02	11,3	2,60E-03	7,80E-03
Fertilizantes	1,98E-01	48,5	5,65E-02	60,9	5,01E-02	5,72E-03
Materiales auxiliares	-	-	2,69E-04	0,3	8,65E-05	1,82E-04
Embalaje	7,20E-02	18,1	6,82E-04	7,31	2,99E-05	5,83E-03
Transporte	6,60E-03	2,01	1,13E-03	1,23	1,04E-04	1,03E-03
2. Establecimiento de cultivo	4,40E-03	1,15	1,18E-02	12,9	5,11E-03	6,74E-03
Preparación y plantación	3,10E-04	0,08	3,31E-03	3,61	2,61E-03	6,97E-04
Riego	3,30E-03	0,83	8,53E-03	9,31	2,50E-03	6,03E-03
Manejo de cultivos	1,70E-04	0,04	-	-	-	-
Fertilización	6,40E-05	0,02	-	-	-	-
Fitosanitarios	3,80E-06	0	-	-	-	-

Etapa aguas arriba	ACV	%	EEIOA	%	Emisiones directas	Emisiones indirectas
Electricidad	4,20E-04	0,09	-	-	-	-
Transporte	3,70E-04	0,09	9,31E-06	0,01	8,52E-07	8,46E-06
Total aguas arriba	4,03E-01	44,9	9,19E-02	8,6	5,98E-02	3,17E-02

ii. Etapa central

La Tabla 4.5. muestra las emisiones de carbono de la etapa central calculadas utilizando ACV (0,095 kg CO<sub>2</sub> eq por UF, equivalente al 10,6% del total) y EEIOA (0,417 kg CO<sub>2</sub> eq por UF, incluyendo tanto las emisiones directas como las indirectas, correspondiente al 38,9% del total). El manejo del cultivo en la fase de producción (3) es el proceso que genera la mayor contribución en ambos métodos (65,1% y 43,4%, respectivamente).

Tabla 4.5. Resultados de la huella de carbono (kg CO<sub>2</sub> eq) por unidad funcional calculada con ACV y EEIOA en la etapa central

Etapa central	ACV	%	EEIOA	%	Emisiones directas	Emisiones indirectas
3. Producción de cultivos	6,86E-02	72,1	2,83E-01	67,9	1,70E-01	1,13E-01
Riego	2,05E-03	2,11	-	-	-	-
Seguro de cultivo	-	-	1,03E-02	2,47	7,05E-04	9,59E-03
Manejo de cultivo	6,19E-02	65,1	1,81E-01	43,4	1,58E-01	2,31E-02
Fertilización	6,97E-04	0,73	-	-	-	-
Fitosanitarios	4,09E-05	0,04	-	-	-	-
Maquinaria	-	-	3,34E-03	0,80	2,76E-04	3,06E-03
Mantenimiento	-	-	1,36E-03	0,33	8,44E-04	5,18E-04
Electricidad	3,20E-03	3,38	7,94E-02	19,1	9,74E-03	6,97E-02
Personal	-	-	7,75E-03	1,86	8,03E-04	6,95E-03
Transporte	7,60E-04	0,80	5,54E-05	0,01	5,07E-06	5,03E-05
4. Planta de procesamiento	2,65E-02	27,9	1,34E-01	32,1	1,61E-02	1,18E-01
Uso de agua	3,48E-05	0,04	1,97E-04	0,05	5,76E-05	1,39E-04
Desperdicio de agua	3,00E-04	0,32	2,17E-05	0,01	1,42E-05	7,51E-06
Trabajadores	-	-	1,85E-02	4,44	1,92E-03	1,66E-02
Electricidad	2,62E-02	27,5	1,15E-01	27,6	1,41E-02	1,01E-01
Total	9,52E-02	10,6	4,17E-01	38,9	1,86E-01	2,31E-01

En esta etapa, las emisiones de EEIOA son significativamente superiores a las calculadas utilizando ACV, especialmente existe una diferencia considerable en la subetapa de producción del cultivo. Esto es debido a que EEIOA considera las emisiones asociadas a la mano de obra (salarios de los trabajadores), seguro del cultivo y gestión del cultivo. Mientras que las emisiones asociadas al riego se registran en ACV por uso de bomba eléctrica para extracción de agua y riego, pero en EEIOA no se registran debido a que están integradas con el manejo de cultivo.

### iii. Etapa aguas abajo

La Tabla 4.6. muestra un total de emisiones de 0,400 kg CO<sub>2</sub> eq por UF calculados con ACV, lo que supone un 44,5% del total de las emisiones estimadas para el ciclo de vida de las nectarinas, y 0,562 kg CO<sub>2</sub> eq por UF calculados con EEIOA, correspondientes al 52,54% del total de emisiones estimadas mediante esta metodología.

En ambos métodos, la subetapa con mayor contribución es la de distribución y almacenamiento con un 94,4% de las emisiones totales en la etapa de aguas arriba mediante ACV y un 81,8% en EEIOA, debido principalmente al consumo de gasóleo en el transporte refrigerado del producto y de electricidad por parte de los equipos de refrigeración mecánica utilizados en las cámaras de conservación de la fruta. También contribuye el origen del mix eléctrico considerado en España en el momento del análisis (2021) que tiene asociado un alto nivel de emisiones debido a la consideración de que la generación eléctrica era altamente dependiente de la combustión de combustibles fósiles.

Las emisiones totales de GEI de ACV y EEIOA por etapas y subetapas del ciclo de vida se muestran en la Tabla 4.7. La cantidad total de GEI emitidos en la producción de 1 kg de nectarinas se calcula en 0,899 kg de CO<sub>2</sub> eq en ACV y 1,071 kg de CO<sub>2</sub> eq en EEIOA. Estos resultados están dentro del rango de 0,22-2,0 kg de CO<sub>2</sub> eq por kg, encontrados en la bibliográfica (Tabla 3.7.) pero son ligeramente superiores al valor medio ( $0,87 \pm 0,98$  kg de CO<sub>2</sub> eq./kg) reportado en estudios previos de ACV realizados en melocotones (Frankowska et al., 2019; Ingraio et al., 2015; Vinyes et al., 2015). En este estudio, se ha considerado un enfoque "de la cuna a la tumba", incluyendo el transporte de larga distancia desde la planta de procesado hasta el distribuidor (800 km) y tres semanas de almacenamiento de la fruta lo que representa una situación intermedia entre las asunciones consideradas en los trabajos de Frankowska et al. 2019, considerando transporte de España a Reino unido y Vinyes et al. 2015, que no incluye transporte, lo que justifica la diferencia en HC encontrada con respecto a estos estudios.

Tabla 4.6. Resultados de la huella de carbono (kg CO<sub>2</sub> eq) por unidad funcional calculada con ACV y EEIOA en la etapa aguas abajo

Etapa aguas abajo	ACV	%	EEIOA	%	Emisiones directas	Emisiones indirectas
5. Distribución y almacenamiento	3,78E-01	94,4	4,60E-01	81,9	5,60E-02	4,04E-01
Refrigeración eléctrica	1,37E-01	34,2	2,29E-01	42,5	2,72E-02	1,94E-01
6. Uso	2,31E-02	5,77	2,16E-03	0,39	4,50E-04	1,71E-03
Energía eléctrica	1,94E-02	5,6	1,78E-03	0,32	2,18E-04	1,56E-03
Uso de agua	2,94E-04	0,05	5,65E-05	0,01	1,65E-05	3,99E-05
Alcantarillado	5,00E-04	0,12	3,26E-04	0,06	2,15E-04	1,11E-04
7.1. Fin de vida: Residuos de comida	-1,66E-03	-0,41	4,43E-02	7,87	3,68E-02	7,51E-03
Transporte	1,80E-03	0,45	1,92E-04	0,03	1,76E-05	1,75E-04
Compostaje	-5,50E-03	-1,37	9,67E-03	1,72	6,88E-03	2,80E-03
Recuperación energética	-1,20E-03	-0,3	6,63E-04	0,12	6,90E-05	5,94E-04
Vertedero	3,24E-03	0,81	3,38E-02	6,0	2,98E-02	3,94E-03
7.2. Fin de vida: Empaque	8,00E-04	0,2	5,58E-02	9,91	2,98E-02	2,61E-02
Transporte	4,10E-03	1,02	1,12E-04	0,02	1,03E-05	1,02E-04
Recuperación energética	-3,90E-03	-0,97	1,76E-02	3,12	1,11E-02	6,45E-03
Reciclaje	-1,20E-03	-0,3	-	-	-	-
Vertedero	1,80E-03	0,45	3,81E-02	6,77	1,87E-02	1,95E-02
Total aguas abajo	4,00E-01	44,56	5,62E-01	52,54	1,23E-01	4,39E-01

La Tabla 4.7. muestra también la comparación entre métodos en términos de relación EEIOA/ACV. Teniendo en cuenta las emisiones totales, la ratio promedio de emisiones entre ambos métodos es de 1,19. Esto significa, que por cada kg de emisiones de CO<sub>2</sub> estimadas mediante ACV, el método EEIOA estima 1,19 kg CO<sub>2</sub> eq. Es decir, que el EEIOA incrementa la HC estimada en un 19% con respecto a las estimaciones de la metodología ACV. Resultados similares fueron encontrados por Alvarez y Rubio 2015, con un ratio de HC entre ambas metodologías de 1,22 para un estudio centrado en el ciclo de vida asociado a la producción del Europalet de madera, y por Castellani et al. 2019 con un ratio de 1,12 para el sistema de consumo doméstico (movilidad, alimentación, menaje, vivienda) en Europa.

Tabla 4.7. Resultados del cálculo de la huella de carbono (kg de CO<sub>2</sub> eq por UF ) mediante las metodologías EEIOA y ACV según etapas y subetapas. También se presenta el valor de la ratio de la huella de carbono del EEIOA frente al ACV. Los valores marcados en rojo indican los máximos

Etapa del ciclo de vida	Emisiones totales EEIOA	%	Emisiones totales ACV	%	Relación EEIOA/ACV
Aguas arriba	0,092	8,58%	0,403	44,90%	0,23
1. Producción de insumos	0,08	7,48%	0,399	44,30%	0,20
2. Establecimiento de cultivos	0,012	1,12%	0,005	0,52%	2,55
Central	0,417	38,90%	0,096	10,60%	4,38
3. Producción de cultivos	0,283	26,40%	0,069	7,64%	4,13
4. Planta de procesamiento	0,134	12,50%	0,027	2,95%	5,04
Aguas abajo	0,562	52,50%	0,40	44,60%	1,40
5. Distribución y almacenamiento	0,46	42,90%	0,318	42,10%	1,22
6. Uso	0,002	0,20%	0,083	2,57%	0,09
7. Fin de vida	0,10	9,35%	-0,001	-0,10%	-100
Total	1,071	100%	0,899	100%	1,19

En cuanto a las diferencias entre métodos por etapas, la etapa central presenta las mayores discrepancias entre ambas metodologías, con una ratio EEIOA/ACV de 4,38. La subetapa de producción del cultivo alcanza una ratio de 4,13, debido a que ACV considera los impactos del uso de los insumos en esa etapa y mientras que EEIOA lo hace en la etapa de aguas arriba (lo que justifica la ratio de 0,2). El procesado en planta de confección alcanza una ratio de 5,04 reflejando que EEIOA estima mayor HC por incluir las emisiones asociadas al coste de los salarios de los operarios.

La etapa que muestra las menores discrepancias entre métodos es la etapa aguas abajo, con una relación EEIOA/ACV de 1,40. Sin embargo, hay que considerar que la base de datos EXIOBASE empleada en el EEIOA no tiene en cuenta ningún sector para los envases reciclables, por lo que las emisiones asociadas al fin de vida mediante EEIOA contribuyen positivamente a la huella de carbono, mientras que en el ACV, al considerar el reciclado, la HC asociada a esta etapa toma el valor negativo de -0,001, que aunque en términos absolutos es una contribución baja, el signo negativo implica que es una etapa en la que se captura carbono. Esto explica por qué la ratio en la etapa fin de vida toma el valor de -100,

lo que significa que por cada kg de CO<sub>2</sub> eq estimado en esta etapa por el EEIOA, el método ACV estima que secuestran 0,01 kg de CO<sub>2</sub> eq.

Respecto al valor de la ratio 0,09 entre escenarios en la subetapa de uso, ese debe al impacto que le otorga el método ACV al consumo de electricidad para la nevera. Esta diferencia puede ser por el origen del mix eléctrico español y la utilización de combustibles fósiles para la generación.

Los resultados del párrafo anterior indican que, aunque la HC total estimada por ambas metodologías es relativamente similar, existen diferencias importantes a nivel de etapa y subetapa. La Figura 4.2. muestra los procesos con mayor contribución en la HC por cada método a lo largo de las etapas del ciclo de vida. Los procesos que no se presentan son aquellos que tienen una contribución inferior al 3% o no son considerados por una u otra metodología. Ambas metodologías coinciden en que el transporte y la electricidad para refrigeración en la subetapa de distribución y almacenamiento son los principales contribuyentes a la HC, con un 42-43% del total.

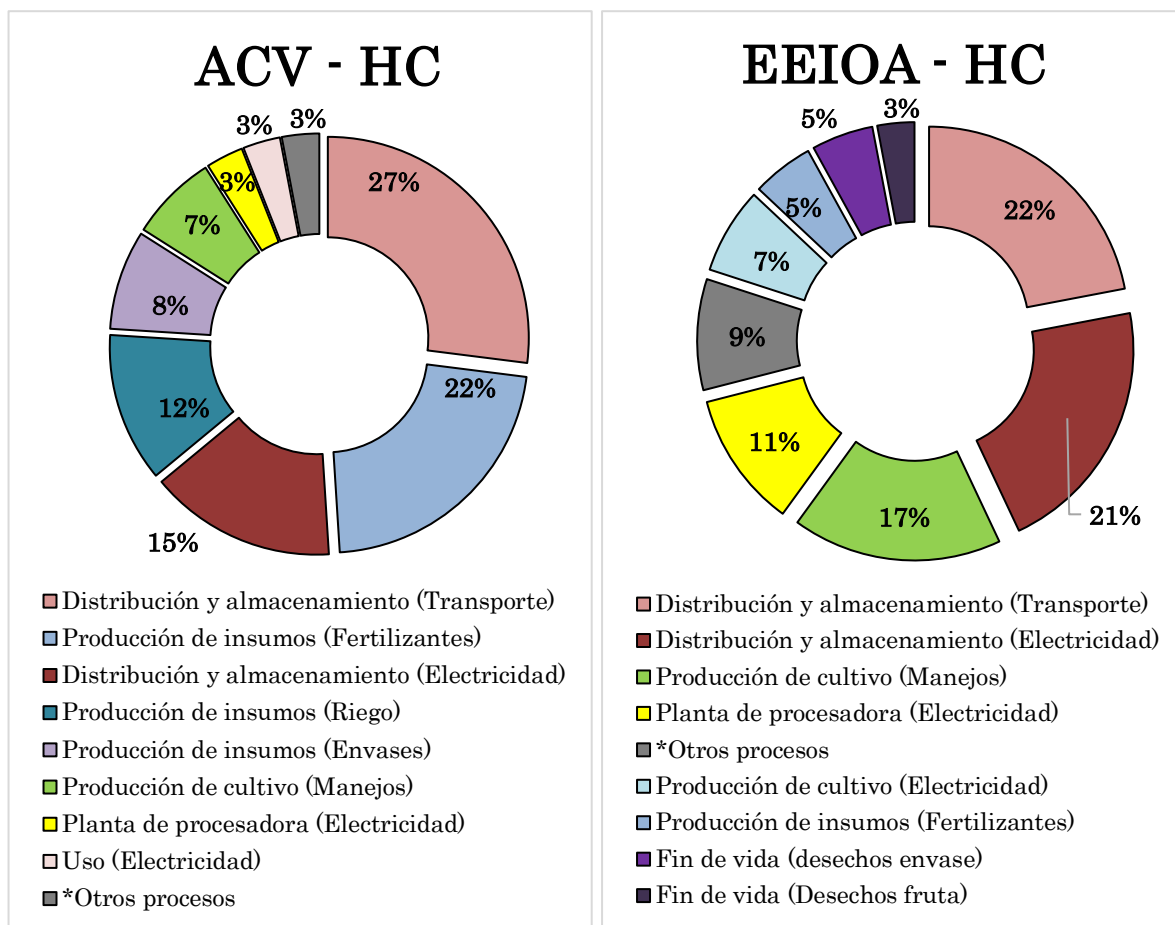


Figura 4.2. Comparación entre métodos de los procesos con mayor contribución porcentual en la huella de carbono a lo largo del ciclo de vida. \*Otros procesos: corresponden con el grupo de procesos no especificados cuya contribución individual a la huella de carbono es inferior al 3%

En el ACV, la etapa de aguas arriba genera una contribución a la HC del 42,5% (producción del sistema de riego 12,5%, de fertilizantes 22%, de envases 8%). El análisis basado en procesos del ACV ofrece un mayor detalle que el EEIOA en la producción de insumos aguas arriba, teniendo en cuenta el sistema de riego, el envasado y la gestión de los cultivos. También incluye información detallada sobre la contribución de los tratamientos fitosanitarios, la fertilización y la energía eléctrica. Esta descripción detallada es una ventaja muy útil en el ACV-A (que sigue una metodología ascendente “bottom up methodology”) a la hora de identificar materiales o procesos con elevadas emisiones y, en consecuencia, sustituirlos por otros más amistosos con el medio ambiente.

EEIOA estima una contribución a la HC de la etapa central del 38,2%. Esto se debe principalmente a los costes asociados al manejo de cultivo y a la energía eléctrica para la producción del cultivo, junto con la energía eléctrica y los trabajadores necesarios en la planta de procesamiento. La diferencia en las emisiones GEI entre ACV de la etapa central (10,6%) y la EEIOA (38,2%) es debido al valor económico del consumo de energía eléctrica en riego y en la planta de proceso en EEIOA reflejándose en un valor mayor de HC comparado ACV. EEIOA también incluye las emisiones derivadas de la contratación de mano de obra fija y temporal (1,86% y 4,44%) y de los seguros de producción (2,47%), que están representadas en la cadena de valor total de la nectarina, que el ACV no considera y que corresponden al 8,77% del total de HC en EEIOA. La diferencia en la HC entre los métodos sin considerar personal y servicios, es de sólo el 8% (0,977 kg CO<sub>2</sub> eq EEIOA vs 0,899 kg CO<sub>2</sub> eq ACV).

Las limitaciones presentes en el estudio se derivan principalmente de la naturaleza y representatividad de la metodología EEIOA, y de la limitada desagregación de los sectores económicos, que no representan necesariamente la situación de materiales y procesos específicos. Las bases de datos de la EEIOA no se actualizan con frecuencia (la base de datos EXIOBASE utilizada en esta investigación describe datos de 2015), por lo que no reflejan los cambios en la estructura económica de las regiones ni las tendencias en la intensidad de las emisiones de los distintos sectores. En los últimos años, se ha observado una tendencia a la baja de la HC de todos los sectores en la UE (EEA, 2020), lo que puede dar lugar a diferencias con respecto a la metodología ACV.

#### 4.1.2.4 Evaluación de la incertidumbre

Para respaldar la solidez de los resultados de la HC del ACV, se ha realizado un análisis de incertidumbre (Figura 4.3.). El análisis del ciclo de vida realizado indica que el valor medio de la huella de carbono es de 0,828 kg CO<sub>2</sub> eq por UF. El análisis de incertidumbre muestra que la mediana es de 0,824 kg CO<sub>2</sub> eq por UF, que es muy similar a la media, lo que indica que la distribución de los datos es bastante simétrica. La desviación típica es de ±0,041 kg CO<sub>2</sub> eq por UF y el coeficiente de variación es del 4,95%, lo que indica que los datos son bastante homogéneos y, por tanto, la media de 0,828 kg CO<sub>2</sub> eq por UF es representativa. El error estándar de la media es de solo 1,45 g de CO<sub>2</sub> eq por UF, y el intervalo de confianza del 95% tiene un límite inferior de 0,76 kg de CO<sub>2</sub> eq por UF y un límite superior de 0,919 kg de CO<sub>2</sub> eq por UF. Estos resultados están dentro del intervalo 0,22-2 kg de CO<sub>2</sub> eq encontrado en estudios anteriores realizados en melocotones (Frankowska et al., 2019; Ingraio et al., 2015; Vinyes et al., 2015).

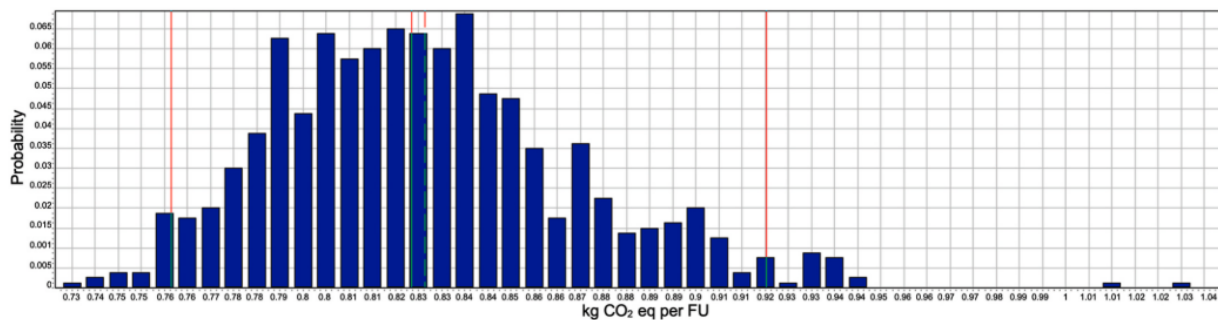


Figura 4.3. Histograma de la distribución de probabilidad de la huella de carbono en kg CO<sub>2</sub> eq por unidad funcional, resultante del análisis de incertidumbre. Las líneas continuas verticales de color rojo en los extremos muestran los límites del intervalo de confianza del 95%

#### 4.1.3 Conclusiones

El análisis de la producción de nectarinas arrojó unas emisiones GEI totales de 1,07 kg de CO<sub>2</sub> eq por UF para el ACV EEIO y de 0,899 kg de CO<sub>2</sub> eq por UF para el ACV de procesos, lo que da como resultado una relación EEIOA/ACV de 1,19. Aunque esta diferencia pueda parecer aceptable, es preocupante que en realidad se deba a compensaciones entre discrepancias mayores que operan en direcciones opuestas en las etapas que componen el ciclo de vida del producto.

Las emisiones de GEI calculadas por ACV fueron significativamente superiores a las determinadas por EEIOA en la etapa aguas arriba (principalmente producción de insumos utilizados para fertilización y materiales de envasado) (ratio 0,23 EEIOA/ACV), mientras que se observa lo contrario en el análisis de la etapa central (producción y procesado de nectarinas) (ratio 4,38 EEIOA/ACV). Las

diferencias en la fase aguas abajo fueron menos notables principalmente distribución y almacenamiento, y fin de vida (ratio 1,40 EEIOA/ACV). Los insumos de base económica, utilizados en EEIOA (mano de obra, seguros y otros costes de servicios) y no contabilizados en ACV, pueden ser en parte responsables de tales divergencias, mientras que otras deben vincularse a diferencias en los procedimientos de evaluación de impacto seguidos por cada una de estas metodologías.

Como ya se ha indicado en la revisión bibliográfica, el ACV ofrece una visión detallada y específica de las emisiones de carbono en cada etapa del proceso de producción, permitiendo identificar áreas concretas donde se pueden realizar mejoras para reducir el impacto ambiental. En este caso el ACV pone el foco en la HC asociada a la producción de insumos fundamentalmente fitosanitarios. Por otro lado, la metodología EEIOA al utilizar datos econométricos para estimar las emisiones basadas en las interacciones económicas entre diferentes sectores, proporciona una visión más amplia y agregada del impacto ambiental a nivel de toda la cadena de suministro. Sin embargo, nuestros resultados plantean algunas dudas sobre el potencial del EEIOA y exigen nuevas investigaciones sobre la validez, la complementariedad y los ámbitos de aplicación de estas metodologías. Ambos enfoques de modelización coinciden en identificar la distribución y el almacenamiento refrigerado (en la etapa aguas abajo) como los procesos del ciclo de vida que más contribuyen a las emisiones de GEI de las nectarinas. Esto exige la aplicación de políticas y acciones dirigidas a promover el consumo de fruta de temporada y local. Otras medidas adicionales deberían abordar el uso de energías renovables en el mix eléctrico consumido durante el almacenamiento refrigerado, la eficiencia en el consumo de insumos de cultivo (por ejemplo, mediante el uso de AP) y de los materiales de envasado.

## **4.2 Un estudio de caso sobre la aplicación de la Evaluación de Impacto Social de Producto al sector agroalimentario: Melocotón listo para consumir**

En esta segunda parte del capítulo se lleva a cabo una evaluación del ACV social aplicado a la cadena de valor de la producción de nectarina lista para consumir, iniciando con un análisis genérico y continuando con un análisis específico. El producto estudiado corresponde a nectarina pelada, cortada y envasada al vacío en su jugo.

El análisis abarca un alcance desde la producción de insumos hasta el fin de vida de los desechos generados en el sistema, utilizando el mismo alcance definido en la primera parte del capítulo, pero enfocado en el área social con propósito de generar un análisis general en las tres áreas de la sostenibilidad. Su objetivo es identificar preliminarmente las etapas con mayor contribución en el impacto social, estableciendo una base para un análisis posterior más detallado.

Los datos empleados provienen de una empresa del sector agroindustrial que integra las etapas de producción agrícola, procesamiento del producto y envasado. Para las etapas de transporte, comercialización, uso y fin de vida, se utilizó información estadística pública e información disponible en internet.

El análisis genérico se realiza utilizando la metodología de ACV social y la base de datos SHDB, y la metodología ACV EEIO con la base de datos EXIOBASE. Por otro lado, el análisis específico se enfoca en la etapa con mayor contribución identificada en el análisis genérico, utilizando la metodología de análisis de impacto social de producto (PSIA).

### **4.2.1 Materiales y métodos**

Esta evaluación se basa en los procedimientos descritos en el análisis de Impacto Social de Producto (PSIA, por sus siglas en inglés). Este apartado corresponde a la definición del objetivo y alcance descritos en el manual de PSIA (Goedkoop, 2020).

#### **4.2.1.1 Definición del objetivo**

El objetivo de este estudio es analizar los posibles riesgos sociales y los beneficios del impacto de la cadena de valor del melocotón trozado y envasado.



Figura 4.4. Envase con melocotón troceado

#### 4.2.1.2 Definición del alcance

Esta investigación tiene como propósito evaluar el impacto social del producto del melocotón trozado envasado en su jugo (listo para consumir) (Figura 4.4.). Considerando los límites desde el cultivo, incluyendo el procesamiento del producto, hasta la fase de uso y fin de vida del producto.

#### 4.2.1.3 Descripción del sistema







i. Evaluación de la materialidad

El melocotón es un producto seleccionado en campo y acondicionado. Una vez en la planta de procesamiento, se pela, se corta y se envasa al vacío en su jugo, con una vida útil de hasta dieciocho meses. Nutricionalmente, se caracteriza por su bajo contenido en calorías, su fibra y contenido de calcio, hierro y potasio (Del Monte, 2023).

ii. Evaluación económica

La Tabla 4.8. muestra la distribución en porcentaje del valor añadido del producto proporcionado por una empresa de procesamiento para el año 2021, del producto definido como Melocotones empaquetados en tazas de frutas individuales con un peso unitario de 113 g, dispuestas 4 unidades en el paquete que se comercializa con un peso total 452 g neto. El valor del transporte no estaba disponible por parte de la empresa, por lo que se consultó en el observatorio de costos del transporte por carretera (MITMA, 2021), siendo de 2 céntimos por kg de producto.

Tabla 4.8. Descripción de cada etapa y proceso del ciclo de vida de la melocotón, junto con los agentes involucrados en la cadena de valor y el porcentaje de contribución económica

Etapa del sistema	Organizaciones	%
Producción de materias primas: Melocotón		11%
Manufactura/Procesamiento: Melocotón, pelado y trozado		25%
Envasado		3%
Transporte: Distribución al minorista		1%
Venta al por menor: Tiendas y supermercados		60%
Fase de uso: Consumo por el usuario		-
Fin de vida: Compostaje y reciclaje		-

#### 4.2.1.4 Estructura del ciclo de vida y límites del sistema

Se utilizan como guía para definir las etapas del estudio evaluado las Reglas de Categoría de Productos (PCR) (EPD, 2019b), que se aplican a los productos de frutas y hortalizas preparados y conservados, incluidos los zumos.

Existe una red compuesta por un número creciente de empresas independientes que colaboran en un proyecto común: la producción de productos vegetales precocinados. Las empresas de la red operan juntas a lo largo de toda la cadena de valor, desde las fases iniciales de cultivo, pasando por las distintas etapas de transformación industrial, hasta que el producto llega al punto de venta (ver Tabla 4.8.).

#### 4.2.1.5 Metodología de evaluación del impacto social

Para una aplicación efectiva de la PSIA, es necesario realizar un análisis preliminar para identificar los puntos críticos en el sistema a estudiar y determinar en qué etapa se requiere la recolección de datos específicos. Este análisis preliminar se lleva a cabo con:

La base de datos SHDB, que compara la demanda de bienes y servicios con sus riesgos sociales, basándose en varios indicadores medidos en horas de riesgo promedio (medium risk hour (mrh)).

El método ACV Social (UNEP, 2009) y el Method 2 V2.00 / Standard. Este método recopila información sobre 18 temas sociales, clasificados en 5 categorías: Vegetales, frutas, frutos secos; Productos alimenticios; Productos químicos de caucho y plásticos; Transporte y Comercio. Basado en el análisis económico descrito anteriormente, la simulación se realizó en SimaPro. Los costos de cada sector se convirtieron de 2020 a 2002 (unidad SHDB).

El análisis input-output, caracterizado por evaluar la relación entre actividades económicas y un indicador. En este estudio, un indicador social toma en cuenta toda la cadena de producción. Se utiliza el inventario económico ya descrito, la base de datos EXIOBASE 3.4 y sus indicadores sociales: total de horas de empleo y horas vulnerables de empleo.

#### 4.2.1.6 Selección de categorías de partes interesadas y temas sociales

Los aspectos sociales y las partes interesadas (stakeholders) se eligieron basándose en un estudio social previo que utilizó datos económicos para centrar el estudio en la etapa de mayor riesgo social. Para garantizar un enfoque integral de la sostenibilidad, se vincularon los cinco Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) del informe de sostenibilidad de la empresa transformadora con los temas sociales del Manual PSIA 2020 (Goedkoop, 2020). Este proceso permitió identificar los siguientes aspectos sociales claves por grupo de interés:

- i. Trabajadores: Salud y Seguridad, Salario Justo, Horas de Trabajo, Discriminación, Libertad de Asociación.
- ii. Usuarios: Salud y Seguridad y Comunicación Responsable.
- iii. Comunidad local: Compromiso Comunitario y Desarrollo Económico.

## 4.2.2 Resultados y discusión

### 4.2.2.1 Inventario del ciclo de vida

El inventario económico se obtuvo a partir de la recolección de datos de la empresa procesadora, así como de diversas fuentes bibliográficas que aportaron información relevante para el análisis. La Tabla 4.8. presenta la etapa de comercialización es la que presenta la mayor contribución económica, alcanzando un 60% del total. Sin embargo, esta fase es también la más difícil de evaluar, dado que involucra a un gran número de empresas que operan en el sector, lo que complica la recopilación de datos precisos y coherentes.

En contraste, la siguiente etapa con mayor contribución económica es la transformación, que se lleva a cabo dentro de la empresa y representa un 25% del total. Esta fase es más manejable en términos de evaluación, ya que las operaciones están centralizadas y se pueden monitorear más fácilmente. La transformación incluye diversos procesos industriales que preparan los productos vegetales para su posterior comercialización, y su análisis puede proporcionar información valiosa sobre la eficiencia y sostenibilidad de las prácticas de producción.

### 4.2.2.2 Evaluación social input-output

La Figura 4.5. presenta la etapa que moviliza más horas de trabajo es la comercialización (67%), seguida por el proceso de producción (18%). Estos resultados están en línea con la distribución del valor agregado utilizado para la definición del inventario económico. Sin embargo, si se enfoca en las horas de trabajo vulnerables, el impacto de la comercialización disminuye significativamente (hasta el 43%), mientras que la relevancia de la etapa de procesamiento aumenta al 40%. El tipo de trabajo altamente inseguro y vulnerable incrementa en esta etapa debido a las fluctuaciones de los ciclos económicos vinculados a la estacionalidad de los ritmos de producción en el procesamiento.

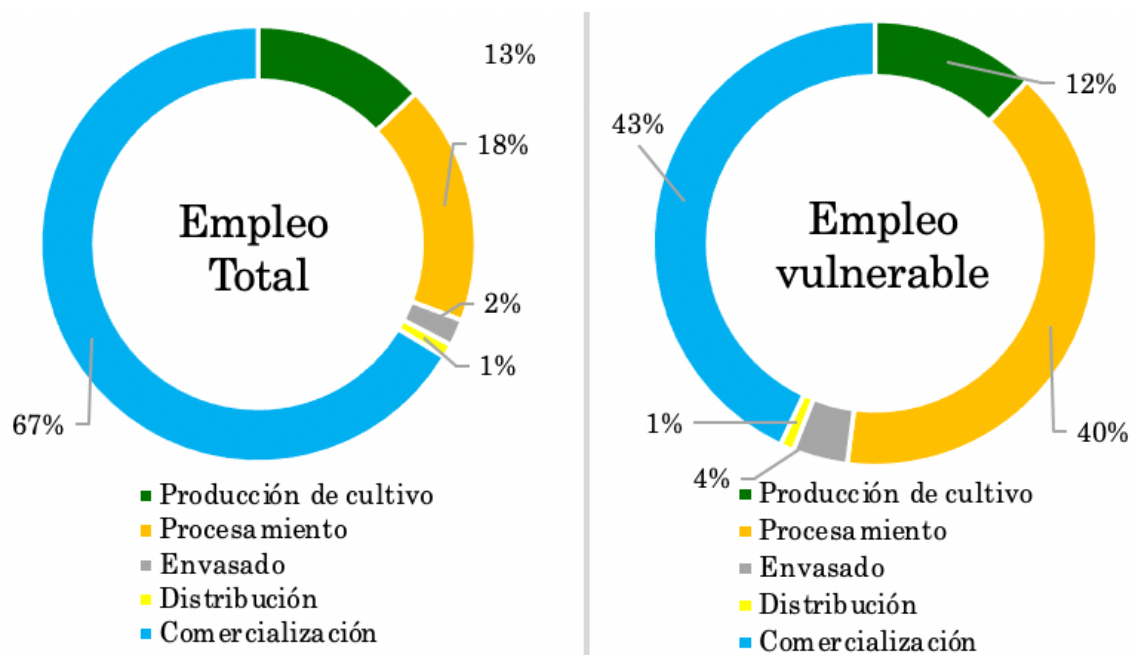


Figura 4.5. Contribución del valor añadido por cada producto a las horas total de empleo (izquierda) y a las horas de trabajo vulnerables (derecha), en cada etapa del ciclo de vida

#### 4.2.2.3 Evaluación de puntos críticos sociales

Como se presenta en la Figura 4.6., nuevamente, la comercialización, la producción agrícola y el procesamiento son las etapas con mayor riesgo social en todas las categorías de impacto. Según esta evaluación, las categorías de tóxicos y peligros, lesiones y muertes, trabajo migrante y negociación colectiva son las que más contribuyen al riesgo de impacto social a lo largo de los ciclos de vida del producto.

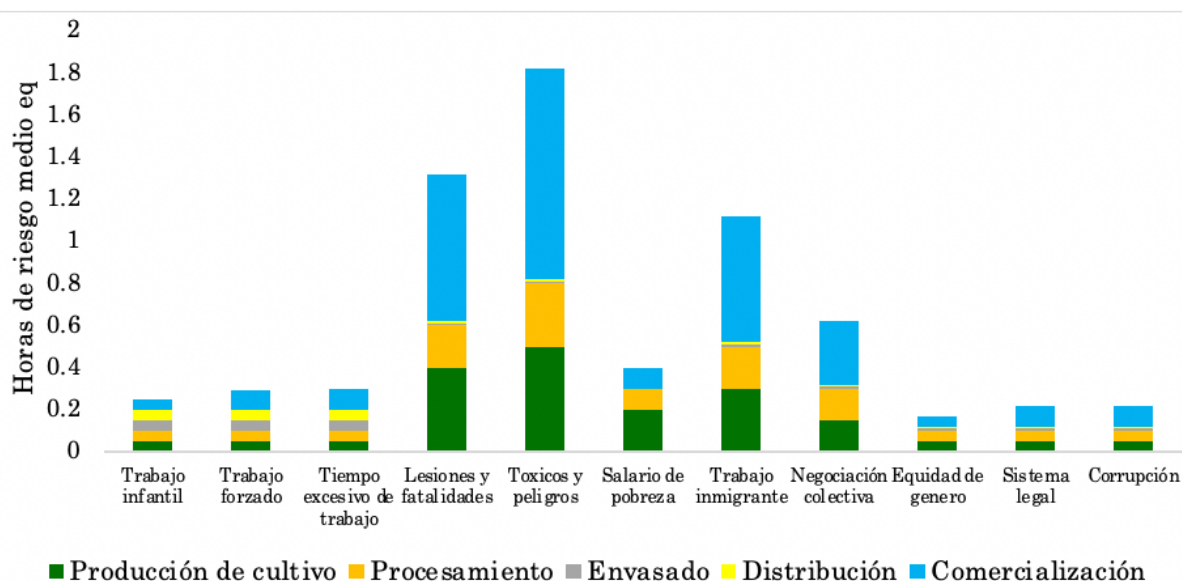


Figura 4.6. Horas de riesgo medio para cada categoría social en cada etapa del ciclo de vida

#### 4.2.2.4 Evaluación del impacto social

La Tabla 4.9. muestra los resultados de la evaluación de temas sociales de la empresa, utilizando la metodología PSIA en trabajadores, usuarios y comunidad local, comparando la situación específica de la empresa con la situación general en el país (España).

##### i. Trabajadores

La evaluación de la categoría de salud y seguridad se establece como +1, considerando que la empresa cuenta con un sistema de gestión para el cumplimiento y la gestión de riesgos en salud y seguridad ocupacional. La tasa mensual de accidentes laborales (INE, 2021) es un 83% menor en la empresa en comparación con los valores registrados en la industria manufacturera (BOE, 1995). La evaluación de salario justo recibe una puntuación de +1, ya que las condiciones salariales en términos de salario mínimo en la empresa son un 11,2% superiores al salario mínimo en su sector, y el bono de riesgo por hora es el doble de lo establecido en el convenio colectivo del sector (BOE, 2021b).

La categoría de horas de trabajo tiene una puntuación de 0. La empresa cuenta con un sistema de gestión que promueve un equilibrio saludable entre el trabajo y la vida personal, pero aspectos como el número de horas trabajadas por año es solo un 2% menor que el número de horas establecido en el convenio colectivo (1776 h) (BOE, 2019). La evaluación de discriminación es +1. La empresa cumple con los requisitos legales y presenta informes públicos con resultados positivos de un sistema de gestión de no discriminación. El 64% de los empleados de la empresa son mujeres, frente al 37.5% en la industria alimentaria a nivel nacional (BOE, 2007). En cuanto a la libertad de negociación colectiva de los trabajadores, la puntuación es +1, ya que la empresa cumple con la ley y no se han encontrado restricciones a la libertad de asociación (BOE, 2003).

##### ii. Usuarios

En la categoría de salud y seguridad, se consideran los siguientes aspectos: el producto es esterilizado; cumple con los requisitos de seguridad alimentaria; es un producto vegetal; no utiliza aditivos y cuenta con tres declaraciones nutricionales aprobadas, además de ser fácil de usar y listo para consumir, lo que facilita su consumo y tiene una influencia favorable en la salud de la población (BOE, 2011). La empresa también cuenta con las certificaciones de seguridad alimentaria IFS y BCR. Por lo tanto, la puntuación en esta categoría es +1. La comunicación responsable tiene una calificación de 0, ya que cumple con la normativa nacional

de etiquetado, pero las afirmaciones realizadas en el marketing y la literatura del producto sobre rendimiento y sostenibilidad no están respaldadas por evidencia científica ni son reportadas públicamente (BOE, 1999).

iii. Comunidad local

La calificación de desarrollo económico de la empresa es +2, ya que hay informes y publicaciones que describen la colaboración público-privada, la creación de empleo y las inversiones en la comunidad local. El 100% de los proveedores principales son nacionales y la empresa promueve el desarrollo de la economía local mediante la organización de eventos, como un festival anual de música nacional que se celebra en la localidad (IDA, 2021).

Tabla 4.9. Evaluación de los indicadores sociales de la empresa

Grupos de interés	Aspecto social	Nivel de escala	Indicador de desempeño	Indicador Referencia	Referencia	Puntos
Trabajadores	Salud y seguridad	Las condiciones de seguridad y salud en el trabajo son adecuadas y la prevención de riesgos se ajusta a la legislación	La empresa tiene un sistema de gestión para mejorar la cultura laboral, más allá de un nivel aceptable y muestra resultados tangibles de estos esfuerzos	Protección de la salud a través de la prevención de riesgos	Ley 11/1995, prevención riesgos laborales	1
	Salario justo	A todos los trabajadores se les paga al menos un salario digno para una familia estándar	Auditorias de la compañía proporcionan evidencia de que esta condición se cumple. El salario mínimo es 14929 euros por año	Salario mínimo	Ley de trabajo - (R.D.L. 1462/2018)	1
	Horas de trabajo/ Equilibrio vida laboral	La empresa cuenta con un sistema de gestión para hacer cumplir la política de equilibrio entre vida laboral y personal	La compañía tiene un sistema de gestión que hace cumplir la política sobre el equilibrio vida laboral personal	1790 h por año	Ley de trabajo - (R.D.L. 8/2019)	0
	Discriminación	La empresa cuenta con un sistema de gestión para hacer cumplir	La compañía tiene un sistema de gestión que promueve la	Derecho a la igualdad y no discriminación	Ley de igualdad de género. 31/1995	1

Grupos de interés	Aspecto social	Nivel de escala	Indicador de desempeño	Indicador Referencia	Referencia	Puntos
		la política de no discriminación.	no discriminación en su organización			
	Libertad de negociación colectiva	La empresa informa a los trabajadores de las decisiones, antes de que se tomen y escucha a los trabajadores en las negociaciones	La compañía informa a los trabajadores de las decisiones antes de que sean tomadas y escucha a los trabajadores en las negociaciones	Derecho a la libertad de asociación	Ley Orgánica 11/1985	1
Usuarios	Salud y seguridad	La empresa dispone de un dossier del producto diseñado con éxito para crear una máxima contribución a la salud y seguridad del usuario	El producto ha sido diseñado para crear un máximo de contribución a la salud y seguridad del usuario	Asegurar la seguridad alimentaria	Ley 17/2011, de seguridad alimentaria y nutrición	1
	Comunicación responsable	La información sobre los productos se elabora de acuerdo con las regulaciones del país de venta y la empresa se adhiere a los principios aceptados	La información del producto se hace según las regulaciones en el país de venta y la compañía adhiere a principios aceptados	Derecho a garantía de información adecuada	R.D. 1334/1999 Norma general de etiquetado de alimentos	0
Comunidad local	Desarrollo económico	La empresa invierte en asociaciones público-privadas o invierte en la comunidad local, creando nuevos puestos de trabajo en la región	La compañía invierte en asociaciones público-privadas o invierte en la comunidad local, creando nuevos empleos en la región	-	International Development Association (IDA)	2
+ 2 = Lo mejor en su clase, mejora continua		+1 = Más allá de una situación generalmente aceptable, la mejora continua		0 = Situación generalment e aceptable	-1 = Situación inaceptable pero mejorando	-2 = Situación inaceptable, sin mejoras
*Fuente: Página web y memoria de sostenibilidad de la empresa 2019					Promedio	0,88

### 4.2.3 Conclusiones

Los consumidores muestran una creciente preocupación por las condiciones en las que se obtienen y producen los productos, así como por los posibles impactos sociales derivados de sus compras. Esta tendencia lleva a las empresas a alinear sus prácticas con las expectativas del público (Benoit-Norris et al., 2012). Para enfrentar estos desafíos, muchas compañías han adoptado el concepto de responsabilidad social corporativa (RSC), que en la mayoría de los casos se limita a cumplir con las obligaciones establecidas por las leyes vigentes (Vavra et al., 2015).

El ACV-S realizado muestra que a pesar de que el inventario económico y el análisis input-output indican que la fase del ciclo de vida con mayor riesgo social es la de comercialización, no fue factible realizar la PSIA en esta etapa debido a la gran diversidad de empresas involucradas. Sin embargo, el análisis input-output mostró que, en términos de empleo vulnerable, la fase de transformación se considera crítica, con una contribución del 40%, a pesar de que solo representa el 18% del empleo total.

La evaluación preliminar de los temas sociales de las partes interesadas para el producto de melocotón en trozos envasado revela una puntuación promedio de 0.88 en la escala de niveles de PSIA. Esta puntuación sitúa a la empresa por encima del nivel generalmente aceptado, sugiriendo un proceso de mejora continua.

En cuanto a la PSIA como herramienta emergente para el análisis social de la sostenibilidad en la cadena de valor, la metodología permite identificar y analizar los orígenes de los conflictos sociales y los actores implicados, así como determinar las medidas necesarias para mejorar el impacto social de la empresa. Las principales dificultades encontradas en la implementación de la PSIA han sido el establecimiento de un marco de referencia adecuado (ya sea nacional, provincial o sectorial), la selección de indicadores relevantes y la disponibilidad de información accesible de la empresa, especialmente en lo que respecta a ciertos temas sociales.

### 4.3 ACV ambiental y económico del escenario de agricultura de precisión para la producción de frutas de hueso

En la tercera parte del presente capítulo, se evalúa el ACV ambiental (considerando cinco categorías de impacto) y económico (costos de insumos) de la producción de nectarina. Pero utilizando un alcance del sistema que se limita a las etapas comprendidas entre la producción de insumos y la entrega de la fruta a granel en la puerta de la finca. Esta delimitación se fundamenta en los resultados obtenidos en la primera parte de este capítulo, donde se identificaron las mayores contribuciones ambientales y económicas en las primeras dos etapas: aguas arriba y central, en un escenario de producción de fruta de hueso convencional.

Debido a esto, se plantea como alternativa de mejora la implementación de tecnologías de AP. Con este fin, se modela un escenario que evalúa los beneficios de estas tecnologías en términos de impacto ambiental y económico. Para ello, se emplea la información recopilada en la revisión bibliográfica (sección 3.1.8.) en relación a los porcentajes de reducción en el uso de insumos, como fertilizantes  $-46\%$  ( $\sigma \pm 12,3$ ), fitosanitarios  $-51\%$  ( $\sigma \pm 17,8$ ) y agua  $-26\%$  ( $\sigma \pm 10,3$ ), mediante el uso de tecnologías descritas en la Tabla 3.2, Tabla 3.3. y Tabla 3.4. Estos porcentajes de reducción se aplicarán a los datos de inventario provenientes de la empresa frutícola en el municipio de Abarán (región de Murcia) del ACV en la primera parte de este capítulo (cuyo inventario se presenta en el Anexo II).

#### 4.3.1 Materiales y métodos

Esta investigación presenta la evaluación ambiental y económica del ciclo de vida de la producción de nectarina (*Prunus persica* var. *Nucipersica*), utilizando datos de inventario de una finca ubicada en la localidad de Abarán (Murcia), en el sureste de España. La parcela abarca 405 hectáreas, con 667 plantas por hectárea, y produce un promedio de 35 toneladas por hectárea al año de fruta fresca, considerando un período productivo de 15 años y 3 años de establecimiento del cultivo. El ACV se llevó a cabo siguiendo la estructura estandarizada propuesta en las normas ISO 14040;14044 2006. El análisis se estructuró en cuatro etapas: definición del objetivo y alcance, inventario del ciclo de vida (ICV), evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) e interpretación de los resultados (Resultados y Discusión).

### 4.3.1.1 Definición de objetivo y alcance

El objetivo principal es evaluar, de manera comparativa, los beneficios ambientales y económicos asociados con la producción de nectarinas utilizando técnicas de agricultura convencional (AC) y técnicas de manejo sitio-específico propias de la AP. Los objetivos secundarios están relacionados con la estimación de la contribución de las diferentes etapas y procesos del ciclo de vida a las principales categorías de impacto ambiental.

i. Límites del sistema

El estudio considera las etapas del ciclo de vida de la producción de nectarinas utilizando un enfoque desde la cuna hasta la puerta de la granja (*cradle to gate*), como se presenta en la Figura 4.7.

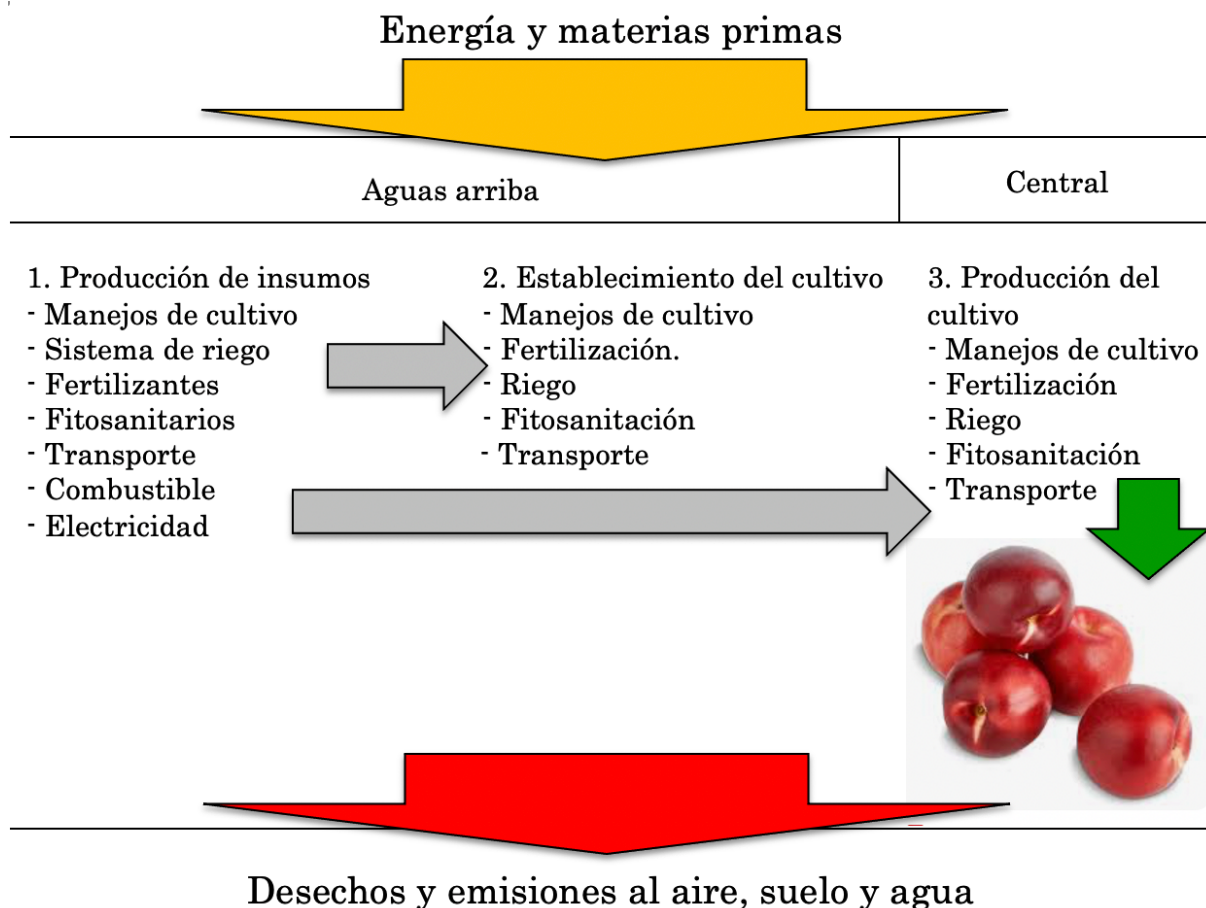


Figura 4.7. Diagrama de las etapas del ciclo de vida y límites del sistema para el producto de nectarinas utilizando el enfoque de cuna a puerta de la finca

ii. Unidad funcional (UF)

La UF se ha definido como 1 kg de nectarinas, sin empaque (a granel), en la puerta de la granja (EPD, 2019a).

### iii. Decisiones metodológicas y herramientas

El análisis se llevó a cabo utilizando el software Simapro v9. (Goedkoop et al., 2016), siguiendo las reglas de categoría de producto (PCR) para frutas y nueces publicadas por la declaración ambiental de producto (EPD, 2019a), y utilizando la EF 3.0 como el método de evaluación del impacto ambiental, tal como lo recomienda la Comisión Europea en sus directrices para la Huella Ambiental de Producto (PEF) (Fazio et al., 2018).

Las categorías de impacto consideradas incluyeron la huella de carbono (HC), la formación de fotoquímica de ozono (FOF), la acidificación (A), la eutrofización de agua dulce (E) y el uso del agua (UA) (ver Tabla 3.6.). También se utilizan indicadores normalizados y ponderados de puntuación única para evaluar el rendimiento ambiental general del sistema y determinar la importancia relativa de cada categoría de impacto. Las emisiones al aire de amoníaco, óxidos de nitrógeno y óxido nítrico (emisión directa) y óxido nitroso (emisión indirecta), así como las emisiones de nitratos y fósforo al agua, se calcularon según la metodología descrita en las directrices del IPCC (2006). Las emisiones por el uso de pesticidas en el aire, aguas superficiales y subterráneas se calcularon utilizando el modelo PestLCI 2.0 (Dijkman et al., 2012). El inventario económico de insumos de una empresa frutícola se utilizó como referencia para evaluar las diferencias en los costos de insumos entre las técnicas AC y AP.

### iv. Etapas del sistema de ciclo de vida

- Etapa aguas arriba (ver Figura 4.7.)

(1) Considera la fabricación de insumos (incluyendo el transporte de los mismos desde la fábrica a la parcela) utilizados en la gestión agronómica del cultivo a lo largo del ciclo de vida del producto como: fertilizantes, productos fitosanitarios, sistema de riego, sistemas de espaldera, plántulas de árboles frutales y combustible.

(2) El establecimiento del cultivo incluye la preparación del suelo, la instalación de los sistemas de espaldera y riego, la plantación, la fertilización (insumos y electricidad), los tratamientos fitosanitarios (incluyendo fungicidas, insecticidas y herbicidas, maquinaria y combustible) y el riego (agua y electricidad) durante los tres años correspondientes al establecimiento del cultivo.

- Etapa central (ver Figura 4.7.)

(3) Aborda la subetapa de producción del cultivo, que incluye el riego (agua y electricidad) y la fertilización (insumos y combustible), los tratamientos fitosanitarios para el control de plagas y enfermedades (fungicidas, insecticidas y herbicidas, combustible), y los manejos del cultivo (preparación del suelo, poda, aclareo y cosecha y el uso de maquinaria y combustible asociado a estas operaciones de cultivo).

#### 4.3.1.2 Inventario del ciclo de vida

La Tabla 4.10. muestra el inventario del ciclo de vida primario para las nectarinas, referido a la UF. Los datos para el escenario AC se obtuvieron directamente del productor, mientras que los datos para el escenario AP se calcularon considerando las reducciones en los insumos reportadas para cultivos similares en la revisión bibliográfica (sección 3.1.8.) de la siguiente manera:  $-46\%$  ( $\sigma \pm 12,3$ ) en fertilizantes (ver Tabla 3.2.),  $-51\%$  ( $\sigma \pm 17,8$ ) en productos fitosanitarios (ver Tabla 3.3.) y  $-26\%$  ( $\sigma \pm 10,3$ ) en riego (ver Tabla 3.4.).

Las suposiciones sobre los datos secundarios, se obtuvieron de la base de datos Ecoinvent v3.7.1 (ecoinvent, 2022) y se presentan a continuación:

- Transporte de insumos de cultivo: se asumió que el transporte se realizaba en camiones EURO5 de 32 t, suponiendo una distancia de 500 km desde la planta de fabricación hasta el lugar de venta y 30 km desde el lugar de venta hasta la parcela del cultivo.

- Electricidad: la producción de alta tensión, la transformación a media tensión y la distribución de la electricidad se estimaron utilizando información de la base de datos, según la mix de electricidad de media tensión de España del año 2021.

- Maquinaria: se considera la fabricación de maquinaria y las emisiones de diésel durante las operaciones.

- Combustible: se considera la extracción de petróleo, el refinado y la distribución al consumidor final en Europa.

- Agua de riego: el cultivo utilizó un sistema de riego por goteo utilizando agua de pozo y bombas eléctricas.

- Fertilizantes: se considera desde la extracción de materias primas hasta la fabricación del producto final.

- Productos fitosanitarios: se considera la producción de ingredientes activos para fungicidas, insecticidas y herbicidas.

Tabla 4.10. Análisis del inventario del ciclo de vida relacionado con una UF en los escenarios AC y AP

AGUAS ARRIBA				CENTRAL			
1. Producción de insumos	unit	AC	AP	3. Producción de cultivo	unit	AC	AP
Fertilizantes	kg	3,90E-02	2,50E-02	Fertilizantes (N-P-K)	kg	3,66E-02	2,37E-02
Fitosanitarios*	kg	7,14E-04	5,80E-04	13-0-46	kg	1,57E-02	8,50E-03
Energía	p	4,46E-03	3,04E-03	15-0-0+26,5 Ca	kg	8,42E-03	8,42E-03
Transporte	tkm	2,70E-02	1,84E-02	21-0-0+60 SO <sub>3</sub>	kg	7,32E-03	3,96E-03
2. Establecimiento de cultivo				0-53-0	kg	5,13E-03	2,77E-03
Fertilizantes (N-P-K)	kg	2,44E-03	1,32E-03	Fitosanitarios*	kg	6,69E-04	5,59E-04
13-0-46	kg	1,05E-03	5,67E-04	Fungicidas	kg	2,67E-05	1,31E-05
15-0-0+26,5 Ca	kg	5,62E-04	3,03E-04	Insecticidas	kg	1,87E-04	9,15E-05
21-0-0+60 SO <sub>3</sub>	kg	4,88E-04	2,64E-04	Herbicidas	kg	4,54E-04	4,54E-04
0-53-0	kg	3,42E-04	1,85E-04	Riego			
Fitosanitarios*	kg	4,46E-05	2,18E-05	Agua	m <sup>3</sup>	1,29E-01	9,26E-02
Fungicidas	kg	1,78E-06	8,72E-07	Electricidad	kWh	4,24E-02	3,05E-02
Insecticidas	kg	1,25E-05	6,10E-06	Otros			
Herbicidas	kg	3,02E-05	1,48E-05	Maquinaria	kg	1,10E-03	1,10E-03
Riego				Combustible	l	1,54E-03	1,46E-03
Agua	m <sup>3</sup>	8,57E-03	6,17E-03	Transporte	tkm	1,12E-03	6,03E-04
Electricidad	kWh	2,83E-03	2,04E-03				
Otros							
Maquinaria	kg	1,14E-04	1,14E-04				
Combustible	l	1,01E-04	9,06E-05				
Transporte	tkm	1,08E-04	4,69E-05				

\* Ingredientes activos

### 4.3.2 Resultados y discusión

#### 4.3.2.1 Evaluación económica

Los se obtuvieron de la facturación recibida por un productor local de frutas en la región de Murcia (España). El precio del agua fue el reportado por la asociación local de riego de Cartagena, Murcia (CRCC, 2022). La tarifa de electricidad consideró el valor del mix nacional (Som Energia, 2022b). El precio del combustible se obtuvo de la confederación española de transporte de mercancías (CETM, 2022).

Tabla 4.11. Resumen de costos de insumos de los escenarios de agricultura convencional (AC) y de aplicación precisión (AP) por unidad funcional (UF= 1 kg de fruta). El ahorro de insumos se calcula como  $(AP-AC)/AC \cdot 100$

Insumo	€ por unidad de insumo	Insumos por UF	AC		AP		Ahorro (%)
			€	%	€	%	
Fertilizantes (kg)	1,22	3,91E-02	0,048	25,40	0,026	22,22	-46*
Fitosanitarios (kg)	53,03	7,13E-04	0,038	20,11	0,019	16,24	-51*
Agua (m <sup>3</sup> )	0,33	1,37E-01	0,045	23,81	0,033	28,21	-26*
Electricidad (kW)	0,37	4,53E-02	0,017	8,99	0,012	10,26	-26
Combustible (l)	1,60	6,10E-03	0,01	5,29	0,006	5,13	-25
Transporte (tkm)	1,1	2,83E-02	0,031	16,40	0,021	17,95	-32
Total			0,189	100	0,117	100	-38

\*Reducción promedio en insumos aplicado de acuerdo a los datos de la Tabla 3.2., Tabla 3.3., y Tabla 3.4.

La Tabla 4.11. muestra el ahorro económico promedio en el consumo de insumos para el cultivo, con una reducción de -46% en fertilizantes y -51% para productos fitosanitarios y -28% en el uso del agua. Esto resulta en un ahorro general en energía y transporte de entre -25% y -32%. El ahorro en insumos agrícolas en el escenario AP fue de 665 EUR ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, siendo el insumo de fertilizantes el que monetariamente más se redujo.

#### 4.3.2.2 Evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida

A continuación, se presentan los resultados de la evaluación del impacto ambiental por categoría de impacto de las nectarinas producidas utilizando las técnicas de AP y las prácticas de la agricultura convencional:

- Huella de carbono. El impacto en esta categoría se calculó en 5,32E-01 kg de CO<sub>2</sub> eq por UF para el escenario AC y 4,24E-01 kg de CO<sub>2</sub> eq por UF para el escenario AP (Tabla 4.12), lo que representa una reducción del 20% a favor de la AP. La Figura 4.8. muestra que la producción de insumos de cultivo (1) es responsable de la mayor parte de las emisiones de gases de efecto invernadero con un 87% en AC y 88% en AP. Dentro de estos insumos de cultivo, la fabricación de fertilizantes (subetapa 1) es la principal contribuyente en ambos escenarios con un 41% en AC y 30,7% en AP. La producción del cultivo (3) es el segundo mayor contribuyente, con 12% en AC y 11% en AP.

- Formación de ozono fotoquímico (FOF). Las emisiones resultaron ser de 2,80E-03 y 2,46E-03 kg eq por UF de compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (NMVOC) para AC y AP respectivamente (ver Tabla 4.12.), lo que representa una reducción del 12% en esta categoría de impacto en el escenario de AP. Como se muestra en la la mayor contribución, con 86% en AC y 88% en AP, proviene de la producción de insumos (1). La producción de cultivo (3) es la segunda etapa del ciclo de vida más importante contribuyendo con 13% en AC y 11% en AP. La misma figura también muestra que la fabricación de insumos de cultivo (subetapa 1) es la principal contribuyente en AC con 49,6% y en AP con 56,4%.

Tabla 4.12. Impactos ambientales de la producción de nectarinas, según categoría de impacto, en el escenario de AC con aplicación uniforme (AU) y de AP con aplicación variable (AV), por unidad funcional (UF = 1 kg de fruta). Dif %: reducción porcentual al comparar AP vs AC calculada como  $(AP-AC)/AC \cdot 100$

Categoría de impacto	Unidad	Producción de insumos		Dif %	Establecimiento de cultivo		Dif %	Producción de cultivo		Dif %	Total		Dif %
		AC	AP		AC	AP		AC	AP		AC	AP	
Huella de carbono	kg CO <sub>2</sub> eq	4,65E-01	3,75E-01	-19	4,44E-03	3,48E-03	-21	6,18E-02	4,55E-02	-26	5,32E-01	4,24E-01	-20
Formación de ozono fotoquímico	kg NMVOC eq	2,40E-03	2,18E-03	-9	2,75E-05	2,16E-05	-21	3,77E-04	2,65E-04	-30	2,80E-03	2,46E-03	-12
Acidificación	mol H <sup>+</sup> eq	2,85E-03	2,27E-03	-20	4,08E-05	3,20E-05	-21	5,70E-04	4,12E-04	-28	3,46E-03	2,72E-03	-22
Eutrofización	kg P eq	1,70E-05	1,44E-05	-15	8,86E-07	6,07E-07	-31	1,44E-05	9,00E-06	-37	3,23E-05	2,40E-05	-26
Uso del Agua	m <sup>3</sup> depriv.	1,85E-02	1,45E-02	-21	8,57E-03	6,34E-03	-26	1,29E-01	9,51E-02	-26	1,56E-01	1,16E-01	-25

- Acidificación (A). Las emisiones resultaron ser de 3,46E-03 y 2,72E-03 mol H+ eq por UF para AC y AP respectivamente (ver Tabla 4.12.), lo que representa un ahorro del 22% debido a utilización de técnicas de AP. Como se muestra en la Figura 4.8. la producción de insumos (1) es el principal contribuyente, con 82% en AC y 84% en AP. La producción de cultivo (3) es la segunda etapa más importante en impacto, con 17% y 15% para AC y AP, respectivamente. Más específicamente, la fabricación de fertilizantes es el proceso principal en esta categoría, contribuyendo con 39,3% del impacto de acidificación en el escenario AC.

- Eutrofización de agua dulce (E). Los resultados muestran 3,23E-05 y 2,40E-05 kg de P eq por UF para AC y AP respectivamente (ver Tabla 4.12.), lo que representa una reducción del 26% en esta categoría como resultado del uso de prácticas de AP. Como se muestra en la Figura 4.8. la producción de insumos (1) es el principal contribuyente, con 52% en AC y 60% en AP. La producción del cultivo (3) contribuye en segundo lugar con 45% y 38% para AC y AP, respectivamente. La misma figura muestra que la fertilización en la producción del cultivo (3) tiene la mayor contribución a este impacto en AC con 36,5% mientras que en AP, es la

producción de insumos para la gestión del cultivo (subetapa 1) que suponen un 29,4%.

- Uso del agua (UA). La categoría de uso del agua determina un consumo de  $1,56E-01$  y  $1,16E-01$  m<sup>3</sup> por UF para AC y AP respectivamente (ver Tabla 4.12.), con un ahorro de agua del 25% en el escenario AP. La producción del cultivo (3) representa una contribución de 83% para AC y 81% para AP (Figura 4.8.). La fabricación de insumos (1) es la segunda etapa con mayor contribución, con 12% y 13% para AC y AP, respectivamente.

El análisis de las categorías de impacto, indica que la producción de insumos de cultivo (1) es responsable de la mayor parte de las cargas ambientales en todas las categorías de impacto, excepto en el uso del agua. Esto se refiere tanto a los escenarios de agricultura convencional como de precisión. Los resultados identifican la fabricación de fertilizantes, la producción de sistemas de riego y de sistemas para el manejo del cultivo como los procesos que más contribuyen a las cargas ambientales de la nectarina.

Debido a su contribución predominante, el proceso de Producción de insumos de cultivo (1) ha sido analizado por separado en la Figura 4.9. utilizando los enfoques de puntuación única normalizada y ponderada de la metodología de evaluación de impacto ambiental EF3.0. Los resultados ilustran una diferencia del -17% entre las prácticas de AC y las de AP. Según esta metodología, el cambio climático (huella de carbono) es la categoría que genera la mayor carga ambiental en esta subetapa en ambos escenarios.

Vinyes et al. 2017, describen el ciclo de vida para la producción de melocotón en España utilizando un enfoque de cuna a tumba (*cradle to grave*) y computando una HC de 0,38 kg de CO<sub>2</sub> eq por kg de fruta, con la mayor contribución correspondiente a la etapa de producción del cultivo. Un análisis similar, pero utilizando un enfoque de cuna a puerta (*cradle to gate*), fue realizado por Ingraio et al., 2015, para la producción de melocotón en Italia. Esta investigación describe una huella de carbono comparativamente menor de 0,22 kg de CO<sub>2</sub> eq por kg de fruta y reporta el riego y el uso de maquinaria agrícola como los mayores contribuyentes.

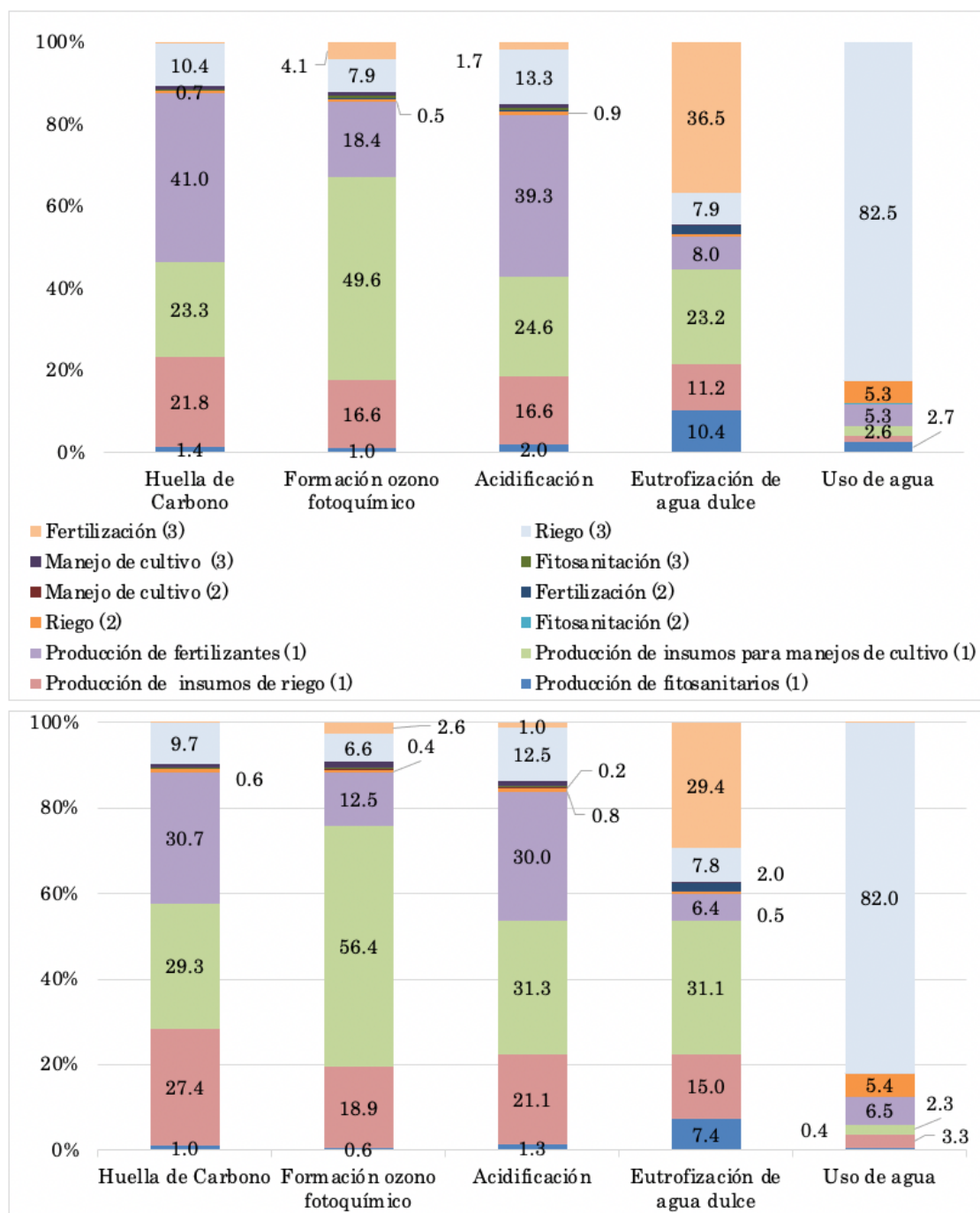


Figura 4.8. Contribución porcentual por subetapa y proceso en cada categoría de impacto considerando el escenario de agricultura convencional (arriba) y el escenario de AP (abajo). (1) Producción de insumos, (2) establecimiento del cultivo, (3) producción del cultivo

Frankowska et al. 2019 calcularon 2,0 kg de CO<sub>2</sub> eq por kg de fruta en un sistema de cuna a tumba, considerando la producción de melocotón y su transporte al Reino Unido. En este caso, las mayores contribuciones ambientales provenían del transporte marítimo desde Sudáfrica y el almacenamiento refrigerado, debido a las grandes distancias y los largos periodos de conservación en refrigeración.

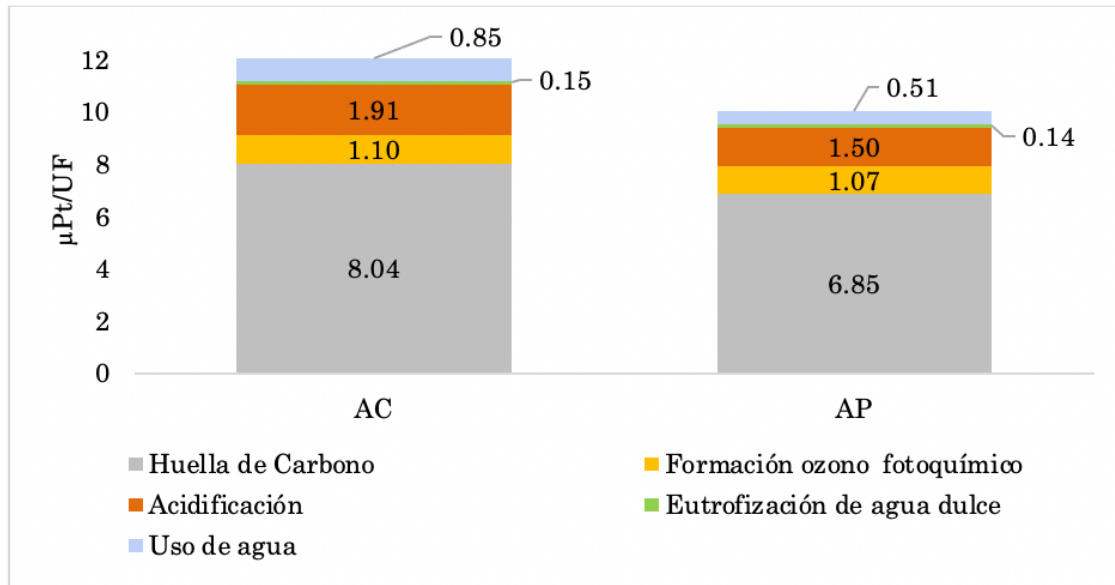


Figura 4.9. Impacto ambiental según la metodología de puntuación única EF3.0 de la fase de producción de insumos necesarios para el cultivo y producción de nectarinas utilizando prácticas de agricultura convencional con aplicación uniforme de insumos (UA) y de AP con aplicación variable (VA) de insumos

Los resultados presentados en esta tesis muestran emisiones comparativamente más altas de gases de efecto invernadero (0,53 kg de CO<sub>2</sub> eq por UF para la AC y 0,42 kg de CO<sub>2</sub> eq por UF para la AP) que las reportadas en la literatura para el consumo local, pero fueron menores que las de los trabajos que se refieren a la producción de fruta de hueso destinada a la exportación. Las otras diferencias pueden estar asociadas con las decisiones metodológicas aplicadas en cada investigación, que están principalmente relacionadas con la consideración de emisiones de CO<sub>2</sub> biogénico (biomasa) y fósil (combustibles), los límites del sistema y el uso de inventarios renovados que describen los mix de energía y utilización de bases de datos actualizadas para la producción de insumos.

En cuanto a las consecuencias ambientales de la implementación de técnicas de AP, Vatsanidou et al. 2020, destacó en su estudio del escenario de AP en el cultivo de peras, que las mayores contribuciones a la HC provienen del riego (mediante bombeo de aguas subterráneas), el uso de maquinaria y la producción del cultivo. Los trabajos considerando un escenario de agricultura convencional de Vinyes et al. 2017, e Ingraio et al. 2015, señalan también la contribución dominante del riego, y la fabricación de fertilizantes y pesticidas en el ACV de la producción de melocotoneros. Estos resultados también están en línea con los encontrados en esta tesis, que describen la prevalencia de la contribución a la huella de carbono del riego, la fertilización y los tratamientos fitosanitarios, que se benefician directamente de las prácticas de AP.

### 4.3.3 Conclusiones

El estudio realizado identifica que la huella de carbono asociada a la producción de nectarinas mediante prácticas de agricultura convencional asciende a 0,53 kg de CO<sub>2</sub> eq por kg de fruta fresca en la puerta de la finca. No obstante, se estima que este valor puede reducirse a 0,42 kg de CO<sub>2</sub> eq mediante la implementación de tecnologías de AP que emplean la aplicación variable de insumos agrícolas.

Los resultados del análisis destacan que la etapa de producción de insumos agrícolas, correspondiente a las fases aguas arriba del ciclo de vida, representa la mayor contribución en cuatro de las cinco categorías de impacto evaluadas, con excepción del uso de agua. Estos insumos incluyen principalmente fertilizantes y productos fitosanitarios utilizados en el manejo del cultivo.

La implementación de técnicas de AP, basadas en la dosificación variable, permite reducir significativamente el uso de insumos, logrando un promedio de disminución del 41% ( $\pm 13$ ). Estas reducciones se reflejan en impactos específicos como un 20% menos en la huella de carbono, un 12% menos en la formación de ozono fotoquímico, un 22% menos en la acidificación, un 26% menos en la eutrofización de agua dulce, y una reducción del 25% en el uso de agua.

En términos económicos, estas prácticas generan ahorros estimados de hasta un 38% en los costos, debido principalmente al menor requerimiento de insumos agrícolas, lo cual también reduce los costos de producción, transporte y uso. Estos resultados confirman y cuantifican los beneficios potenciales de la AP, tanto desde una perspectiva ambiental como económica, y pueden ser utilizados como base para la formulación de políticas y estrategias orientadas a fomentar prácticas agrícolas más sostenibles.

Sin embargo, se reconoce la necesidad de realizar un análisis más detallado basado en datos de un escenario real de producción de fruta de hueso utilizando tecnologías de AP y específicamente para la etapa central del ciclo de vida, debido a las limitaciones de precisión derivadas del uso de porcentajes de reducción obtenidos de estudios en otros cultivos, que no reflejan completamente las particularidades de los frutales de hueso. Este análisis, centrado en un enfoque "gate to gate" (de la puerta del proveedor a la puerta de la finca), permitiría evaluar con mayor exactitud los impactos potenciales asociados a la actividad agrícola al incorporar las técnicas de AP.

## 4.4 Evaluación tecnoeconómica, medioambiental y social de la agricultura de precisión para la producción de fruta de hueso

En el estudio final del presente capítulo se lleva a cabo una evaluación de análisis del ciclo de vida ambiental, económico y social de la producción de fruta de hueso (nectarina), en un escenario real donde se utilizan tecnologías de manejo sitio-específico. Este análisis abarca un alcance de puerta a puerta, según los datos descubiertos en el estudio anterior, para centrarse en esta instancia en la subetapa de producción de cultivo. Esta subetapa está compuesta por los procesos de fertilización, fitosanitización, riego y manejos del cultivo para identificar con más detalle los beneficios en la reducción del impacto potencial en las áreas de sostenibilidad. Los datos de inventario utilizados provienen de una empresa frutícola ubicada en la región de Murcia (Cieza), donde se miden los beneficios de la transición de un escenario de agricultura convencional a la implementación del escenario de tecnologías de precisión en el uso de insumos en una parcela de cultivo a lo largo de siete campañas de producción (el inventario correspondiente se presenta en el Anexo III).

### 4.4.1 Materiales y métodos

El escenario analizado se centra en una plantación con 5 variedades de Nectarina temprana (*Prunus persica Nucipersica*) con una superficie de 18,9 hectáreas, dividida en 5 cuarteles o huertos de 3,78 ha promedio seleccionados para utilizar tecnologías de AP, ubicados en el municipio de Cieza, Murcia, España. Esta plantación cuenta con una densidad de 667 árboles por hectárea y una producción promedio de 35 toneladas de fruta fresca por hectárea al año.

El análisis de ciclo de vida (ACV ambiental + ACV social + CCV) realizado sigue los principios de las normas ISO 14040-14044:2006 y el marco teórico ASCV (UNEP, 2011). Aborda las cuatro etapas iterativas: definición de objetivos y alcance, análisis de inventario del ciclo de vida (AICV), evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV) e interpretación del ciclo de vida.

#### 4.4.1.1 Definición del objetivo y alcance

El propósito de este estudio es evaluar el desempeño del análisis del ciclo de vida en términos ambientales (ACV ambiental), sociales (ACV social) y económicos (CCV) de un sistema de producción de fruta de hueso.

Se consideran dos escenarios distintos: uno que emplea una aplicación variable de insumos utilizando tecnologías de AP y otro que utiliza una aplicación uniforme de insumos mediante tecnologías de AC.

La UF definida para este análisis es de 1 kg de nectarinas, presentadas sin envasar (a granel) y listas para la expedición en la finca. Este estudio limita su alcance principalmente a la fase de producción, para el análisis en detalle del impacto de la etapa de producción agrícola, que es donde se concentra el consumo de insumos lo que permitirá evaluar el impacto del uso de las técnicas AP. Por lo tanto, el alcance adoptado es de tipo “puerta a puerta” (gate to gate farm), abarcando desde la adquisición de insumos hasta que los frutos están listos para la salida desde la explotación agrícola.

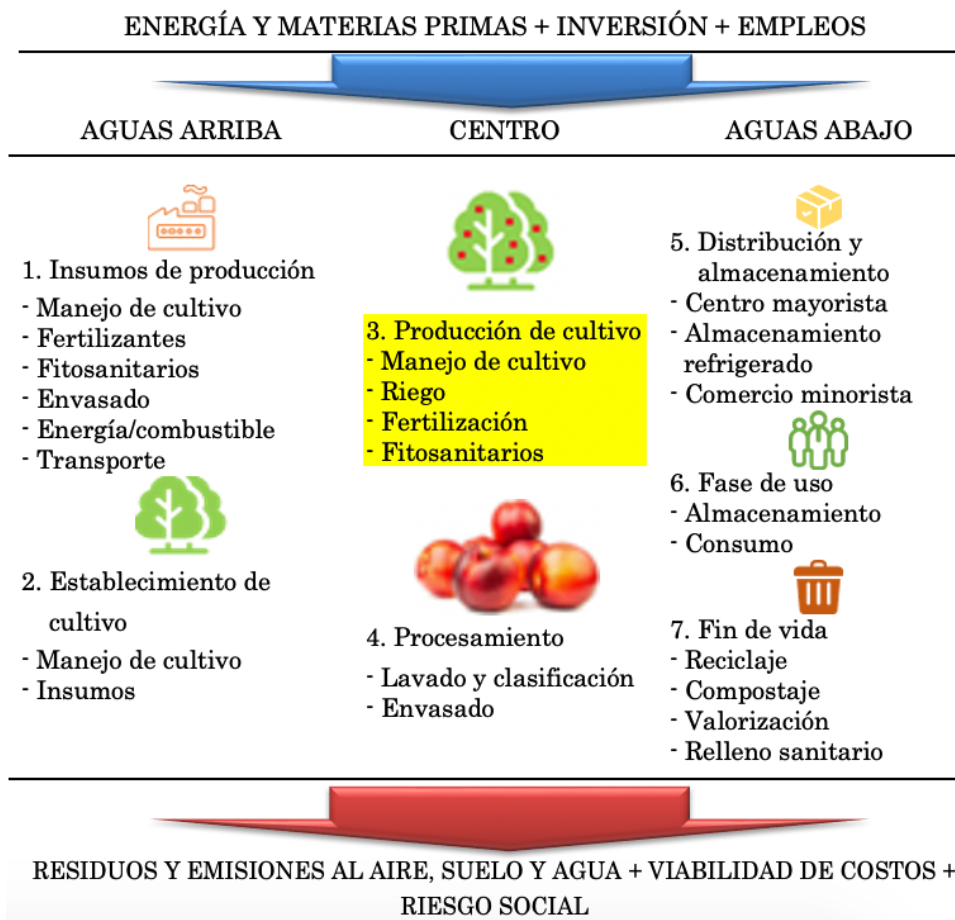


Figura 4.10. Ciclo de vida de la fruta de hueso con el alcance de la cuna al fin de vida. Se destaca en amarillo el alcance del estudio en la etapa de producción del cultivo (alcance de puerta a puerta)

Se cuenta con registros detallados de riego, fertilización y uso de productos fitosanitarios correspondientes a un periodo total de 10 años: los primeros 3 años corresponden al establecimiento del cultivo desde la plantación hasta que el árbol tiene la edad fisiológica para iniciar su etapa productiva. Los datos correspondientes a las 7 temporadas posteriores, corresponden a los que se analizarán (etapa 3 en Figura 4.10.). Los datos correspondientes al escenario convencional de la etapa producción de cultivo, corresponde al descrito para este escenario en la sección 4.3.1.2.

Para el manejo sitio-específico en la finca estudiada se sigue la tecnología basada en sensores para la aplicación de dosis variables. Se recuerda que en este caso, no se requieren mapas ni sistemas de posicionamiento, en su lugar, se utilizan sensores que supervisan las condiciones del suelo y del cultivo.

Los dispositivos instalados en esta finca incluyen (ver Tabla 4.13.) sensores de campo que miden la humedad del suelo, temperatura, niveles de nutrientes (en agua de fertirriego y drenaje en la zona radicular), pH, sensores de vegetación y trampas de feromonas; estación meteorológica propia que proporciona datos climáticos en tiempo real, como la temperatura, la humedad y las precipitaciones; historial del cultivo que incluye datos sobre los rendimientos anteriores, el uso de insumos, plagas y enfermedades, y patrones de riego.

En el escenario de AP, se sigue una estrategia de riego deficitario (RD) en la que la programación del riego se fundamenta en el cálculo de la evapotranspiración ajustada del cultivo ( $ET_c$  adj), complementado con el uso de sondas volumétricas de humedad del suelo y caudalímetros con registradores de datos conectados en red. Además, se realizan mediciones del potencial hídrico en las hojas (cámara de presión). Esto se apoya adicionalmente con los datos de la estación meteorológica. Se dispone de un sistema de almacenamiento y gestión de datos que se analizan en tiempo real mediante modelos predictivos para la determinación de riego según el sitio en la finca.

En contraste, el escenario convencional, se basa en un programa de riego que utiliza el cálculo estándar de la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) y los datos meteorológicos proporcionados por la red de estaciones del sistema de información agraria de Murcia (SIAM, 2020).

En el escenario AP, el plan de fertilización mediante fertirrigación y aplicación foliar, se adapta según los rendimientos específicos de cada sector de la parcela, incorporando dos tipos de análisis: uno de suelo y otro foliar. Además, se realizan análisis químicos del agua utilizada en la fertirrigación y de los drenajes durante toda la temporada. En contraste, el método tradicional de fertirrigación

se basa en los rendimientos promedio de la parcela, lleva a cabo un único análisis de suelo por campaña y sigue las directrices proporcionadas por el proveedor de fertilizantes dependiendo de la fase fenológica del cultivo.

Tabla 4.13. Elementos empleados para el manejo sitio-específico

Insumo	Tecnologías de medición	Tecnologías de información y comunicación	Tecnologías de reacción
Riego	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sondas de Humedad y de conductividad eléctrica ES-2 METER.</li> <li>- Cámara de presión Scholander PMS. CPS-PMS1 para mediciones manuales en hojas.</li> </ul>	Data loggers conectados a redes inalámbricas de transmisión de datos.	Controlador del sistema de fertirriego para el accionamiento de electroválvulas en los sectores representativos de la parcela.
Fertilización	Set para la determinación de la disponibilidad real de nutrientes en el suelo para mediciones manuales ModpoW. Incluye: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sondas de succión de 30 y 60 cm, conectores y jeringuillas para extracción. S.S.A.T. Irrrometer Co..</li> <li>- Medidores electrónicos de concentraciones de N, K, Na y Ca, y pH y conductividad eléctrica LAGUAtwin.</li> <li>- Análisis de laboratorio de suelo y foliar.</li> </ul>		Controlador del sistema de fertirriego para el accionamiento de electroválvulas en los sectores representativos de la parcela y dosificadores de fertilizantes.
Tratamientos fitosanitarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estación agrometeorológica con sensores de T°, HR, velocidad del viento e irradiación.</li> <li>- Trampas de feromonas y bases DELTA, para las plagas potenciales. Probodelt.</li> </ul>	Gateway GPRS con tarjeta SIM integrada.	- Cuota anual acceso a plataforma icloud de estimación de riesgo epidemiológico.

En cuanto a la aplicación de productos fitosanitarios, el enfoque en el escenario AP se orienta hacia un método proactivo que evalúa la probabilidad de aparición de enfermedades utilizando los datos climáticos de la estación

meteorológica propia, que está dotada de un sistema de comunicación para enviar los datos a la iCloud de la empresa. En la nube se dispone de un sistema de almacenamiento y gestión de datos que se analizan en tiempo real mediante modelos predictivos para la determinación de los manejos fitosanitarios específicos del sitio dependiendo de las precipitaciones y humedad ambiental entre otros parámetros analizados del cultivo y que lleva asociado un servicio de alertas, para ayuda a la toma de decisión, especialmente para los tratamientos fúngicos. Este enfoque, en el caso del control de insectos se complementa con un seguimiento riguroso de la presencia de insectos, gestionado principalmente mediante la monitorización de trampas de feromonas. Por el contrario, en el escenario tradicional, la programación de fungicidas e insecticidas depende exclusivamente del calendario agrícola y la fase del cultivo, adoptando un enfoque más reactivo y menos especializado.

#### 4.4.1.2 Análisis de inventario de ciclo de vida (AICV)

La Tabla 4.14. detalla el inventario de insumos utilizados por temporada en el ciclo de vida de la nectarina, expresado por UF. Este inventario se compila para ambos escenarios, tomando datos primarios reales de una empresa dedicada a la producción de fruta de hueso en Murcia. Adicionalmente, los datos secundarios relativos al consumo de energía, transporte, maquinaria y riego fueron extraídos de la base de datos Ecoinvent v3.7 (Ecoinvent, 2020), proporcionando una visión exhaustiva de los recursos involucrados.

Tabla 4.14. Inventario de ciclo de vida por unidad funcional (1 kg de fruta) en los escenarios de AP y AC. Se presenta la diferencia porcentual (Dif) de insumos entre escenarios (Diferencia (%))=(AP-AC)/AC ·100

Producción de cultivo			AC		AP		Dif (%)
Insumos de cultivo	unidad	€/unidad	Inventario de proceso Cantidad/UF	Inventario Económico €/UF	Inventario de proceso Cantidad/UF	Inventario Económico €/UF	
<b>Fertilización</b>							
13-0-46	kg	1,22	1,57E-02	1,92E-02	1,33E-02	1,63E-02	
15-0-0-26,5 Ca	kg	1,17	8,42E-03	9,85E-03	7,16E-03	8,37E-03	
21-0-0-60 SO <sub>3</sub>	kg	1,21	7,32E-03	8,86E-03	6,22E-03	7,53E-03	
0-53-0	kg	1,2	5,13E-03	6,16E-03	4,36E-03	5,23E-03	
		subtotal	3,66E-02	4,40E-02	3,11E-02	3,74E-02	-15
<b>Riego</b>							
Agua	m <sup>3</sup>	3,30E-01	1,29E-01	4,26E-02	9,03E-02	2,98E-02	
Electricidad	kWh	3,70E-01	4,24E-02	1,57E-02	2,97E-02	1,10E-02	
		subtotal		5,83E-02		4,08E-02	-30

Producción de cultivo			AC		AP		Dif (%)
Insumos de cultivo	unidad	€/unidad	Inventario de proceso Cantidad/ UF	Inventario Económico €/UF	Inventario de proceso Cantidad/ UF	Inventario Económico €/UF	
<b>Fitosanitarios*</b>							
Fungicidas	kg	5,30E+01	2,67E-05	1,42E-03	2,40E-05	1,27E-03	
Insecticidas	kg	5,20E+01	1,87E-04	9,73E-03	1,68E-04	8,76E-03	
		subtotal	2,14E-04	1,11E-02	1,92E-04	1,00E-02	-10
Tecnologías AP	ha	8,21E-03	0	0	1	8,21E-03	100
<b>Otros</b>							
Personal técnico	hora	1,40E+01	3,60E-03	5,04E-02	4,10E-03	5,74E-02	14
Maquinaria	ha	1,60E-02	8,60E-03	1,38E-04	7,74E-03	1,24E-04	-10
Combustible	l	1,60E+00	1,44E-03	2,30E-03	1,11E-03	1,77E-03	-23
Transporte	tkm	1,10E+00	2,83E-02	3,11E-02	2,41E-02	2,65E-02	-15
		subtotal		8,40E-02		8,58E-02	2
<i>* Ingrediente activo</i>			TOTAL	1,97E-01		1,74E-01	8

#### 4.4.1.3 Evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV)

##### i. Evaluación de impacto ambiental

Para realizar el análisis se utilizó el software Simapro v9.2, aplicando las reglas de categoría de producto (PCR) para frutas y frutos secos (EPD, 2019a) y el método de evaluación de impacto ambiental EF 3.0 (Fazio et al., 2018). Las categorías de impacto ambiental analizadas incluyeron el cambio climático, la formación fotoquímica de ozono (FOF), la acidificación atmosférica (A), la eutrofización de aguas dulces (E) y el consumo de agua (CA), permitiendo una comprensión detallada de los efectos medioambientales asociados con la producción de nectarinas en los escenarios considerados. Las emisiones al aire de amoníaco, óxidos de nitrógeno y óxido nítrico (emisión directa) y óxido nitroso (emisión indirecta), así como las emisiones de nitratos y fósforo al agua, se calcularon según la metodología descrita en las directrices del IPCC (2006). Las emisiones por el uso de pesticidas en el aire, aguas superficiales y subterráneas se calcularon utilizando el modelo PestLCI 2.0 (Dijkman et al., 2012).

##### ii. Evaluación de costes

En esta evaluación, solo se consideraron los costes puerta a puerta para ambos escenarios de producción. Se analizaron exclusivamente los costes directos de adquisición para la empresa. La evaluación de viabilidad económica incluye únicamente los costos de compra (C) para la empresa, tal como se define en la Ecuación 4.1.

Costos de compra (C) = C fertilización + C riego + C fitosanitarios + C tecnologías AP +  
C personal técnico + C maquinaria + C combustible + C transporte.

Ecuación 4.1. Costos de compra

Los precios de mercado para productos fitosanitarios y fertilizantes fueron suministrados por la empresa productora. El coste del agua se basó en las tarifas de la comunidad de regantes de Cartagena (Murcia, España) (CRCC, 2022), mientras que la tarifa eléctrica reflejó el valor del mix energético nacional (Som Energia, 2022a). Los precios del combustible fueron proporcionados por la Confederación Española de Transporte de Mercancías (CETM, 2022), si bien el alcance de puerta a puerta no considera el transporte de la fruta desde la finca a la central de confección, ni en las posteriores etapas de distribución de la fruta, en este trabajo se incluye en lo que respecta al transporte de insumos desde la fábrica de producción hasta la finca.

Los costes asociados con la adquisición y gestión de las tecnologías de manejo sitio-específico se derivaron de varias fuentes especializadas, y se presenta en conjunto con un 1 en el ítem Tecnologías AP del inventario de ciclo de vida del escenario AP en la Tabla 4.14. Estos costes incluyen análisis de suelo y foliar (CSR Laboratorio, 2023) y la utilización de un sistema de gestión online para fertilización, sensores y riego con sondas interconectadas (ModpoW, 2023) y costes de trampas, atrayentes y feromonas que son monitoreadas por personal técnico (PROBODELT, 2023), así como la estación meteorológica y el software de alerta de enfermedades fúngicas (TAMIC, 2022). En la Tabla 4.14. se presentan los costes de adquisición para los escenarios AP y AC, y en la sección “Resultados económicos” se proporciona un análisis comparativo de estos costes.

iii. Evaluación impacto social

La evaluación se realizó utilizando el inventario económico diferenciado para los escenarios AC y AP, junto con los datos de riesgo social proporcionados por la Social Hotspot Database (SHDB, 2022). La SHDB identifica y cuantifica mediante el indicador de horas de riesgo medio equivalente (mrh eq) los riesgos sociales asociados a diversos sectores económicos, incluyendo indicadores críticos como el tiempo de trabajo excesivo, el empleo migrante, y las lesiones y muertes. Para adaptar los costos a un marco de comparación uniforme, los valores fueron ajustados, utilizando el deflactor adecuado basado en la tasa de inflación oficial y los ratios de conversión de divisas vigentes para utilizar correctamente la base de datos (Euro del año 2022 al Dólar E.E.U.U. del año 2011).

## 4.4.2 Resultados y discusión

### 4.4.2.1 Impacto ambiental

Los resultados de la Tabla 4.15. presentan que en la categoría de cambio climático, la AP disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero de 9,33E-02 a 7,01E-02 kg CO<sub>2</sub> eq, lo que representa una reducción del 24,8%. Asimismo, la formación fotoquímica de ozono se reduce en un 20,3%, pasando de 5,87E-04 a 4,68E-04 kg NMVOC eq. Esto sugiere un menor uso de sustancias volátiles que contribuyen a la contaminación del aire.

En cuanto a la acidificación, la AP disminuye el impacto en un 24,3%, con una reducción de 7,71E-04 a 5,83E-04 mol H<sup>+</sup> eq, reflejando una menor liberación de sustancias ácidas como óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre.

Tabla 4.15. Análisis de impacto ambiental del escenario de AC y de AP por unidad funcional (UF=1 kg nectarinas) y categoría de impacto. Se presenta la diferencia porcentual de las categorías analizadas entre escenarios (Diferencia (%)=(AP-AC)/ACx100); y el porcentaje sobre el total del impacto asociado a la implementación y uso de las tecnologías asociadas a la AP

Categoría de impacto	Unidad	AC	AP	Diferencia (%)	Tecnología AP (%)
Cambio climático	kg CO <sub>2</sub> eq	9,33E-02	7,01E-02	-24,8	0,36
Formación fotoquímica de ozono	kg NMVOC eq	5,87E-04	4,68E-04	-20,3	0,18
Acidificación	mol H <sup>+</sup> eq	7,71E-04	5,83E-04	-24,3	0,25
Eutrofización, agua dulce	kg P eq	1,51E-05	1,24E-05	-17,6	0,25
Uso del agua	m <sup>3</sup> depriv.	1,29E-01	9,04E-02	-29,9	0,05
			Promedio	-23,4	0,22

La eutrofización en agua dulce también disminuye, con una reducción del 17,6% en la liberación de nutrientes (1,51E-05 a 1,24E-05 kg P eq), lo que disminuye la contaminación del agua. Por último, el uso del agua se reduce en un 29,9%, de 1,29E-01 a 9,04E-02 m<sup>3</sup>, lo que indica una monitorización y gestión hídrica más eficiente.

El escenario AP ofrece una solución más sostenible, reduciendo entre un 17,6% y un 29,9% los impactos ambientales en indicadores claves, destacando en el uso eficiente de agua, la mitigación del cambio climático y reducción de la

acidificación. En promedio, los indicadores del escenario AP mostraron una disminución del 23,4%. El impacto ambiental de la implementación de las tecnologías de agricultura precisión en el escenario AP se estima en un 0,22% en promedio del total del impacto de las categorías analizadas, lo que significa que un impacto ambiental mínimo provoca una reducción media de un 23,4%.

#### 4.4.2.2 Resultados de costes

La Figura 4.11. presenta los resultados de la evaluación de costes en los escenarios de AC y AP. En términos de fertilización, el escenario AP utiliza 0,037 € por UF, lo que representa una disminución de costes del 15% (Tabla 4.14.) en comparación con los 0,044 € por UF del escenario AC. En cuanto a los costes asociados al riego, el uso de agua y la electricidad, se reducen en un 30% pasando de 0,058 a 0,041 € por UF, lo que refleja que la optimización lograda mediante sensores y sistemas de monitoreo, junto con la metodología de riego deficitario, mejora la gestión hídrica. Respecto a los fitosanitarios, la diferencia es mínima, con un costo de 0,010 € por UF en AP, un 10% menor que los 0,011 € por UF en AC. Esta reducción puede atribuirse a la detección temprana de plagas, que permite intervenciones más específicas.

Aunque la inversión en tecnologías AP añade un costo de 0,008 € por UF, su impacto en los costes totales es relativamente pequeño en comparación con los ahorros que se consiguen en insumos. La AP también tiene una mayor necesidad de personal técnico, con costos en personal que aumentan de 0,050 a 0,057 € por UF, lo que representa un incremento de costes del 14%, justificable por la necesidad de personal capacitado en el manejo de tecnologías avanzadas y la monitorización de la finca.

En cuanto al combustible, transporte y maquinaria, categorizados como “Otros” en Tabla 4.14., los ahorros en combustible en AP alcanzaron el 23%, disminuyendo el gasto en combustible de 0,0023 a 0,0018 € por UF, mientras que en transporte se registró una reducción pasando de 0,031 a 0,026 € por UF. Esta disminución de los costes en combustible y transporte se deben al menor requerimiento de insumos que es necesario transportar desde el punto de producción de insumos a la finca. Por último, el coste de maquinaria muestra una leve disminución en el escenario de AP, con un valor de 0,00014 frente a 0,00012 € por UF. Esta reducción se atribuye al uso de maquinaria para el tratamiento con fitosanitarios únicamente cuando la densidad de insectos capturados en las trampas de feromonas lo indican o existen avisos del software de control de plagas

y enfermedades, en lugar de realizar tratamientos con dosis estándar y una programación estándar según el estado fenológico del cultivo.

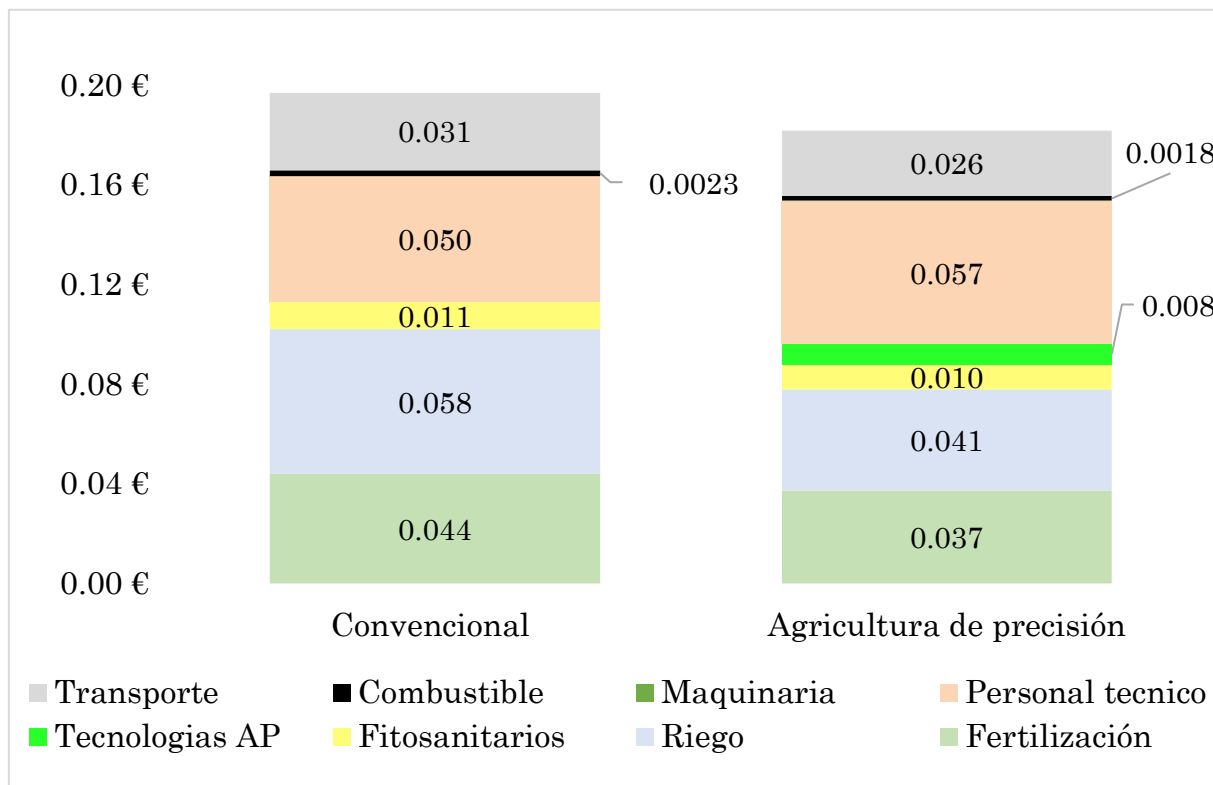


Figura 4.11. Costes de cada categoría de inventario para el escenario convencional y el de AP por unidad funcional (1kg de nectarinas)

La diferencia promedio de costes entre los escenarios de AC y de AP fue del 8%. Es importante mencionar que los costos asociados a tareas como aclareo, poda o recolección no se incluyeron en este análisis, ya que generalmente no se ven impactados significativamente por las tecnologías de AP. La implementación de tecnologías AP, incluyendo el personal técnico, resultó en un costo de 287 € por ha, con un ahorro total correspondiente de 532 € por hectárea al año.

#### 4.4.2.3 Impacto social

La etapa de producción del cultivo, que requiere la adquisición y aplicación y uso de los insumos, presenta en general los mayores riesgos sociales en prácticamente todas las categorías de impacto social evaluadas, reflejando los desafíos inherentes al sector agrícola en España.

La Figura 4.12. muestra para ambos escenarios las contribuciones al riesgo social asociado a los insumos empleados en el cultivo y a otros factores, como las necesidades de personal técnico, maquinaria, combustible y transporte, y, además, en el caso de la AP, asociado a la tecnología específica necesaria para la

implementación de este escenario. Según la evaluación, las categorías de impacto Tiempo de Trabajo Excesivo, Libertad de Asociación, Trabajo Migrante, y Lesiones y Muertes son las principales contribuyentes al riesgo social.

Los resultados muestran que el número de horas de riesgo medio para el conjunto de categorías de impacto social en el escenario de AC es de 1,045 mrh eq por UF, mientras que el escenario AP es de 0,611 mrh eq por UF, lo que significa que se observa una reducción media del 41,5% en el número de horas de riesgo medio en el escenario AP frente al escenario AC.

En cuanto al trabajo infantil, el escenario AC presenta un impacto total de 0,046 mrh eq por UF, mientras que en el escenario AP, este valor se reduce a 0,029 mrh eq por UF. Respecto al trabajo forzoso, el escenario AC tiene un impacto total de 0,097 mrh eq por UF, que se reduce a 0,030 mrh eq por UF con el uso de AP, siendo la categoría en la que el riesgo de social disminuye más drásticamente con un descenso del 69,1%.

El tiempo de trabajo excesivo también muestra mejoras en el escenario de AP. El escenario convencional registra un impacto total de 0,118 mrh eq por UF, mientras que el sistema AP reduce este impacto a 0,082 mrh eq por UF, lo que representa una disminución del 30,5%. Este cambio sugiere que la automatización y el manejo sitio-específico de los insumos permiten una optimización en el tiempo de trabajo.

La categoría de libertad de asociación, es la categoría de riesgo social más importante en el escenario de AC con un valor total de 0,189 mrh eq por UF. En el escenario AP, este valor se reduce a 0,118 mrh eq por UF. Esto sugiere que el uso de tecnologías promueve mejores condiciones laborales y mayor respeto por los derechos de los trabajadores.

Los riesgos relacionados con el trabajo migrante también disminuyen al implementar AP, pasando de un total de 0,106 mrh eq por UF en el escenario AC a 0,051 mrh eq por UF en el escenario AP. Esto indica que las tecnologías de precisión contribuyen a mejorar las condiciones laborales para los trabajadores migrantes.

Por otro lado, en la categoría de lesiones y muertes, el escenario AC presenta un impacto total de 0,145 mrh eq por UF, mientras que el escenario AP reduce este valor a 0,091 mrh eq por UF. Esto demuestra que el escenario AP también puede mejorar la seguridad laboral en el sector agrícola.

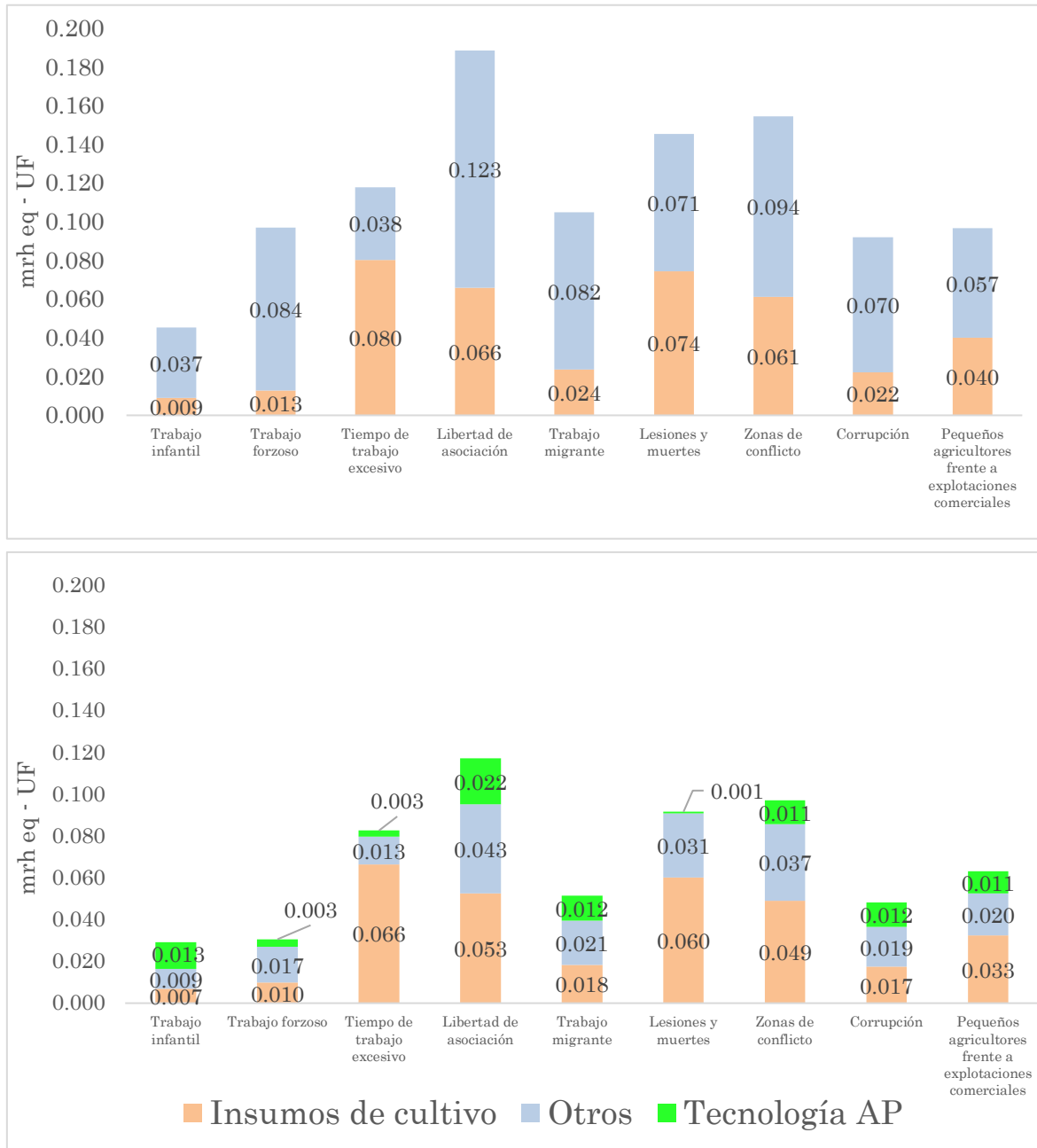


Figura 4.12. Riesgo medio hora equivalente por unidad funcional (UF=1 kg nectarinas) para cada categoría de impacto social en el escenario de agricultura convencional (arriba) y de AP (abajo)

### 4.4.3 Conclusiones

El análisis demuestra que las tecnologías de AP tienen un considerable potencial para mitigar el impacto ambiental, no solo en relación con el cambio climático, sino también en áreas como la formación fotoquímica de ozono, la acidificación, la eutrofización y el consumo de agua. Las mejoras se logran con un impacto ambiental mínimo asociado a la producción e implementación de estas

tecnologías, representando en promedio solo el 0,22% del total de impactos generados en el escenario de AP.

El análisis de costos revela una reducción del 8% entre los escenarios. La implementación de AP, que incluye personal técnico y la implementación de tecnologías, tuvo un costo de 287 € por hectárea al año, generando un ahorro total de 532 € por hectárea al año. La reducción de costos se debe principalmente a la disminución en las necesidades de insumos (promedio de -18%) y otros gastos (promedio de -9%).

En cuanto a los riesgos sociales, el escenario convencional presentó un 42% más de riesgos (*medium risk hour eq*) en comparación con el escenario de AP. Esto puede explicarse por el hecho de que la AP desplaza ciertas actividades del sector agrícola, que suele tener mayores riesgos sociales, hacia el sector tecnológico, que según las bases de datos genéricas, presenta un mejor desempeño en términos sociales. Para validar estos hallazgos, sería recomendable realizar un análisis social detallado del ciclo de vida con un alcance desde la cuna a la tumba, para analizar el impacto considerando la disminución en la aplicación y en la producción de los insumos en la etapa aguas arriba.

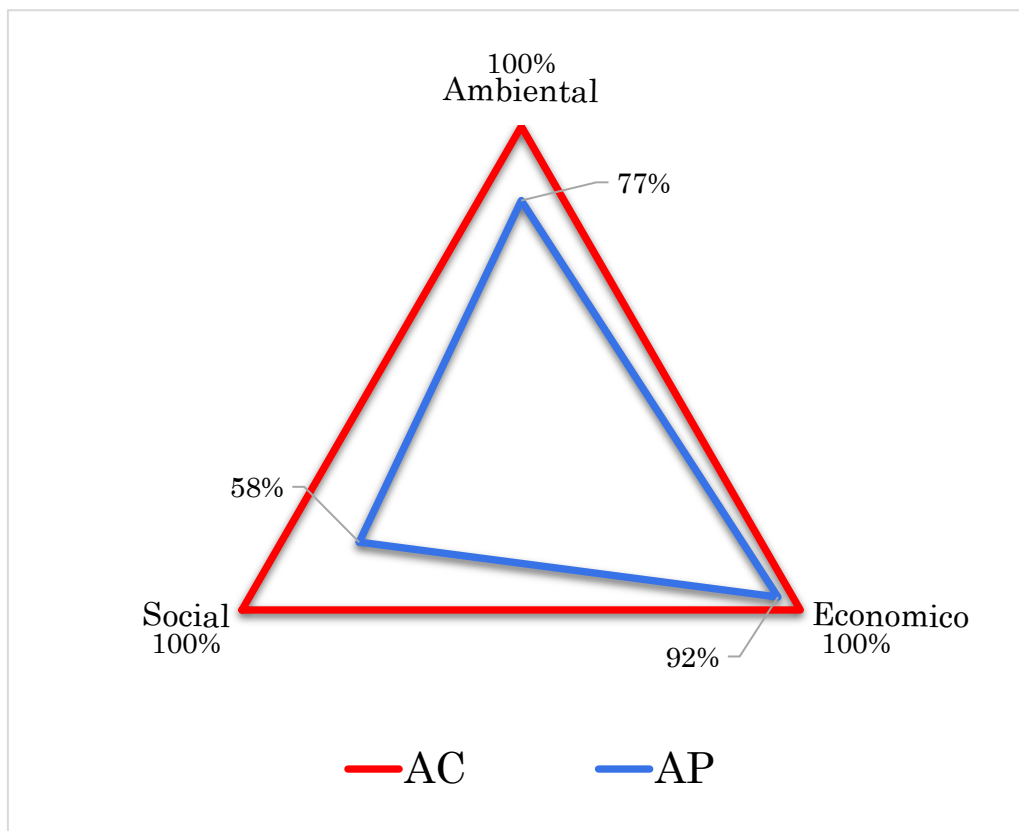


Figura 4.13. Representación gráfica de los resultados de la Análisis de la sostenibilidad del ciclo de vida (ASCV) entre los escenarios de Agricultura Convencional y de Precisión

Se estima que la reducción promedio de impactos ambientales (23%), económicos (8%) y sociales (42%) debido a la implementación de tecnologías de la AP es del 24%. En la Figura 4.13. se presentan los resultados de ambos escenarios para ser comparados, donde al escenario de AC se le asigna el 100% en las 3 áreas y para el escenario AP se presentan los porcentajes de disminución en comparación con AC. Estos resultados subrayan y visualizan los posibles beneficios económicos, ambientales y sociales de gestionar los cultivos con tecnologías avanzadas. La disminución significativa en los impactos sociales, en particular, destaca cómo la AP puede mejorar las condiciones laborales y reducir el trabajo forzoso, el trabajo migrante y las lesiones y muertes, promoviendo un entorno agrícola más seguro, justo y equitativo.

Además, estos hallazgos apoyan los objetivos de la Política Agrícola Común y el Pacto Verde Europeo, proporcionando una base sólida para respaldar políticas y decisiones orientadas hacia prácticas agrícolas más sostenibles. La alineación con estas políticas refuerza el compromiso de los agricultores con la sostenibilidad y contribuye a la competitividad del sector agrícola en un contexto de creciente presión por prácticas responsables y sostenibles.

Para obtener una evaluación más completa, sería necesario ampliar el alcance del análisis del ciclo de vida (ACV), incluyendo etapas cruciales como la producción de materias primas, el comercio y el fin de vida. Al considerar estas fases, se podría modelar integralmente el impacto de los beneficios derivados de la implementación de tecnología de AP digital en un ACV de producción de fruta. Esto permitiría no solo entender mejor los beneficios directos de la AP, sino también identificar oportunidades adicionales para reducir impactos y mejorar la sostenibilidad en toda la cadena de valor agrícola.

## 5 Conclusiones generales y futuras líneas de investigación

### 5.1 Conclusiones

Las conclusiones del análisis ciclo de vida de la producción de frutas de hueso destacan varios aspectos clave en relación con el impacto ambiental, social y económico de las técnicas agrícolas convencionales y la AP.

En primer lugar, el estudio comparativo entre el ACV y EEIOA reveló discrepancias significativas en las emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo del ciclo de vida de las nectarinas:

- La metodología ACV de procesos calcula una huella de carbono de 0,899 kg CO<sub>2</sub> eq por unidad funcional (UF), mientras que el método EEIOA estima 1,07 kg CO<sub>2</sub> eq por UF, mostrando una diferencia del 19% debido a enfoques diferentes en las etapas y procesos considerados.
- En lo que se refiere a las contribuciones por etapa: Aguas arriba, las emisiones de GEI son mayores en ACV (44,9%) que en EEIOA (8,6%). La producción de insumos como fertilizantes es el principal contribuyente en ambas metodologías; Etapa central, EEIOA reporta mayores emisiones (38,9%) frente a ACV (10,6%), debido a la inclusión de factores como mano de obra y seguros en EEIOA; Aguas abajo, las emisiones son similares en ambas metodologías (ACV: 44,6%; EEIOA: 52,5%), siendo el transporte y la refrigeración los principales factores de impacto.
- El ACV es más detallado, permitiendo identificar áreas específicas para la mejora, como la reducción de insumos altamente emisores. Por otro lado, el EEIOA ofrece una visión amplia del impacto en la cadena de suministro, pero es menos preciso en etapas específicas debido a la falta de actualización de bases de datos económicas y la baja granularidad de los sectores modelados.
- Se identifican algunas oportunidades de mejora como promover el consumo local y de temporada para reducir el impacto del transporte, fomentar el uso de energías renovables en el almacenamiento refrigerado e implementar prácticas de AP para optimizar el uso de insumos.

- Aunque las emisiones totales estimadas por ambos métodos son similares, las discrepancias en etapas específicas resaltan la necesidad de combinar ambas metodologías para obtener una visión más completa y precisa del impacto ambiental.

En cuanto a los riesgos sociales asociados a la producción de nectarina lista para consumo:

- La comercialización es la etapa con mayor contribución al riesgo social (67% del empleo total), pero no se pudo realizar un análisis detallado (PSIA) debido a la diversidad de empresas involucradas. La etapa de transformación, aunque representa solo el 18% del empleo total, es crítica en términos de empleo vulnerable (40%), debido a la estacionalidad del sector.
- La comercialización aporta el 60% del valor agregado del producto, mientras que la transformación contribuye con el 25%. Estas son las dos etapas más significativas desde una perspectiva económica.
- Las categorías con mayor riesgo social identificadas fueron "tóxicos y peligros", "lesiones y muertes", "trabajo migrante" y "negociación colectiva".
- La metodología PSIA enfrentó dificultades para definir un marco de referencia sectorial y seleccionar indicadores relevantes. La disponibilidad de datos confiables fue un desafío, especialmente en la etapa de comercialización, limitando el análisis.
- La metodología PSIA se confirma como una herramienta valiosa para identificar conflictos sociales y diseñar estrategias de mitigación en la cadena de valor, aunque requiere más refinamiento en términos de indicadores y acceso a datos.

El estudio del escenario de AP basado en datos secundarios resalta los beneficios significativos de la implementación de este escenario:

- La AP reduce el uso promedio de insumos en un 41%, incluyendo: fertilizantes 46%, fitosanitarios 51%, agua 26%. Estas reducciones disminuyen tanto las emisiones como los costos asociados al transporte y uso de insumos.
- La AP reduce la huella de carbono en un 20%, pasando de 0,53 kg CO<sub>2</sub> eq en la agricultura convencional (AC) a 0,42 kg CO<sub>2</sub> eq por kg de fruta fresca en la puerta de la finca. Otras reducciones significativas incluyen: formación de ozono fotoquímico en un 12%, acidificación 22%, eutrofización de agua dulce 26% y uso de agua 25%.
- La producción de insumos agrícolas (fertilizantes, fitosanitarios y sistemas de riego) en la etapa aguas arriba es la principal fuente de impacto ambiental en

cuatro de las cinco categorías evaluadas. La producción del cultivo (etapa central) también contribuye significativamente, especialmente en el uso del agua (83% en AC y 81% en AP).

- Los costos totales se reducen en un 38% en el escenario de AP, con un ahorro promedio de 665 EUR por hectárea al año. Los fertilizantes representan el mayor ahorro monetario.
- Los beneficios de la AP son particularmente relevantes en las categorías relacionadas con el manejo de insumos, como fertilizantes y fitosanitarios, y el uso eficiente del agua, confirmando su potencial para fomentar prácticas agrícolas sostenibles.
- Los datos utilizados para el escenario de AP provienen de reducciones observadas en otros cultivos, lo que limita la precisión en la evaluación específica de frutales de hueso. Se requiere un análisis más detallado de escenarios reales centrado en un enfoque "gate to gate" para evaluar con mayor exactitud los impactos de la AP en la producción de fruta de hueso.
- Los resultados ofrecen una base sólida para formular políticas que promuevan la adopción de la AP, integrando beneficios económicos y ambientales, y alineándose con objetivos de sostenibilidad agrícola.

El estudio de la implementación real del escenario de agricultura de precisión-digital basado en datos primarios resalta los beneficios significativos de la implementación de tecnologías digitales en la gestión del cultivo y la aplicación de dosificación variable:

- La AP logró una reducción promedio del 23% en las principales categorías de impacto ambiental respecto a la AC, destacándose en: cambio climático con una reducción del 24,8% en emisiones de gases de efecto invernadero (de  $9,33E-02$  a  $7,01E-02$  kg CO<sub>2</sub> eq por kg de fruta); consumo de agua con una disminución del 29,9%, reflejando una gestión hídrica más eficiente; Acidificación una disminución del 24,3%; Formación fotoquímica de ozono una reducción del 20,3% y Eutrofización en agua dulce una reducción del 17,6%.
- El impacto ambiental derivado de las tecnologías utilizadas en AP representa solo el 0,22% del total de impactos generados, mostrando que las mejoras se logran con un impacto mínimo de las tecnologías en sí.
- Los costos promedio se redujeron en un 8% con AP, destacándose: Fertilización, disminución del 15% ; Riego, reducción del 30% en costos de agua y electricidad; Fitosanitarios con una reducción del 10%, atribuida a la detección temprana de

plagas; Otros costos (combustible, transporte, maquinaria) con un promedio de reducción del 9%, asociado a la menor necesidad de insumos.

- La inversión en tecnologías de AP costó 287 € por hectárea al año, pero generó un ahorro total de 532 € por hectárea al año.
- Los riesgos sociales promedio disminuyeron en un 42% con AP, según las métricas de "medium risk hour equivalent (mrh eq)". Las mejoras incluyen: Trabajo forzoso reducción del 69,1%; Trabajo migrante reducción del 51,8%; Lesiones y muertes disminución del 37,2%; Tiempo de trabajo excesivo disminución del 30,5%; Libertad de asociación, mejora significativa, con una reducción del 37,5% en el riesgo asociado; trabajo infantil, reducción del 37%. Estas mejoras se deben a la transición de actividades de alto riesgo social hacia sectores tecnológicos con mejores estándares laborales.
- La integración de tecnologías avanzadas, como el uso de sensores, análisis de datos en tiempo real y estrategias de manejo sitio-específico optimizó el uso de recursos y redujo los impactos en las tres dimensiones de sostenibilidad.
- Los resultados apoyan la alineación con objetivos de la Política Agrícola Común y el Pacto Verde Europeo, demostrando que la AP contribuye a la sostenibilidad y competitividad agrícola.
- El estudio revela algunas limitaciones y recomendaciones como: Ampliar el alcance del ACV para incluir fases como la producción de materias primas, distribución y fin de vida para capturar todos los beneficios potenciales de la AP. Validar hallazgos en sistemas más amplios, se necesita un análisis adicional para evaluar el impacto de las reducciones de insumos y la sostenibilidad en etapas aguas arriba.

En conclusión, la implementación de tecnologías de AP no solo genera beneficios ambientales (reducción del 23%), sino también económicos (ahorros del 8%) y sociales (mejoras del 42%), posicionándola como una estrategia clave para avanzar hacia prácticas agrícolas más sostenibles y competitivas.

## 5.2 Líneas futuras de investigación

Las líneas de investigación futuras deben centrarse en abordar las limitaciones identificadas y en expandir el alcance y precisión de los análisis realizados, integrando de manera más completa las dimensiones ambiental, económica y social. Los principales aspectos que podrían guiar estos trabajos son:

- Integración metodológica entre ACV y EEIOA.

Es fundamental explorar la combinación de metodologías como el ACV y el EEIOA basado en inventarios económicos. Si bien el ACV permite identificar áreas específicas para la mejora, el EEIOA ofrece una perspectiva más amplia de los impactos en la cadena de suministro. Futuras investigaciones deben enfocarse en desarrollar herramientas híbridas que combinen la granularidad del ACV con la visión agregada del EEIOA, incorporando aspectos que no suelen considerarse en el ACV, como el impacto de la mano de obra, los seguros, y otros elementos económicos.

- Extensión del alcance a "cradle to grave".

Ampliar el alcance de los análisis hacia un enfoque "cradle to grave" para evaluar integralmente los impactos ambientales, sociales y económicos de las tecnologías de AP. Esto implicaría incluir el impacto de la extracción y producción de materias primas para insumos agrícolas, la manufactura y distribución de las tecnologías AP, el uso en campo y el fin de vida de los equipos y materiales asociados.

- Validación en escenarios reales de AP.

Aunque el estudio mostró reducciones significativas en insumos y emisiones, los datos utilizados para el escenario de AP provienen principalmente de estimaciones basadas en otros cultivos. Es necesario realizar investigaciones en escenarios reales de producción de frutas de hueso, utilizando datos primarios que permitan evaluar con mayor exactitud los impactos ambientales, económicos y sociales, especialmente en etapas específicas como la producción del cultivo.

- Desarrollo de indicadores sociales más robustos.

La evaluación social mostró limitaciones en términos de selección de indicadores y acceso a datos relevantes. Futuras investigaciones deberían enfocarse en desarrollar métricas más específicas para identificar y mitigar los riesgos sociales en todas las etapas de la cadena de valor, incluyendo la comercialización, que presenta altos riesgos pero fue difícil de analizar en detalle debido a la diversidad de empresas involucradas.

- Evaluación de beneficios indirectos.

Es importante investigar los efectos indirectos de la implementación de tecnologías AP, como el fomento del empleo especializado, el impacto en la adopción de prácticas sostenibles en comunidades agrícolas y los efectos en el cambio de percepción del consumidor hacia productos agrícolas más sostenibles.

- Optimización de la gestión hídrica y de insumos.

La investigación debe continuar explorando estrategias específicas para maximizar los beneficios en el manejo del agua y los insumos agrícolas en los sistemas de AP. Esto incluye el perfeccionamiento de tecnologías de monitoreo y análisis de datos en tiempo real para mejorar la toma de decisiones y reducir aún más los costos y el impacto ambiental.

- Políticas y estrategias de implementación de AP.

Se recomienda formular estudios que identifiquen barreras económicas, sociales y regulatorias para la adopción masiva de AP, proponiendo políticas públicas que incentiven su implementación. Esto podría incluir subsidios para pequeñas y medianas explotaciones agrícolas, formación en tecnologías AP y promoción de alianzas entre agricultores y empresas tecnológicas.

- Impactos a largo plazo en sostenibilidad.

Ampliar los horizontes temporales de los análisis para evaluar los impactos acumulativos y a largo plazo de la implementación de AP, especialmente en términos de degradación del suelo, cambio climático y resiliencia de las comunidades agrícolas frente a eventos climáticos extremos.

Estas líneas de investigación tienen el potencial de ofrecer un marco más completo y preciso para evaluar y optimizar el impacto de la AP, alineándose con los objetivos de sostenibilidad agrícola y contribuyendo al cumplimiento de políticas como el Pacto Verde Europeo y la Política Agrícola Común. A medida que se generen más datos y herramientas analíticas, será posible impulsar la transición hacia sistemas agrícolas más sostenibles y competitivos a nivel global.



## Referencias

- Adamchuk, V. I. (2006). Characterizing Soil Variability Using On-the-Go Sensing Technology. *Site-Specific Management Guidelines, SSMG*, 44(605), 1–4.
- Adamchuk, Viacheslav, Wenjun, Ji, Viscarra, R., Rossel, Robin, Gebbers, Nicolas, & Tremblay. (2018). Proximal soil and plant sensing. *Precision Agriculture Basics, June*, 119–140. <https://doi.org/10.2134/precisionagbasics.2016.0093>
- AEMET. (2024). *Biblioteca de módulos TEMPO - Agencia Estatal de Meteorología*.
- Aggelopoulou, K. D., Pateras, D., Fountas, S., Gemtos, T. A., & Nanos, G. D. (2010). Soil spatial variability and site-specific fertilization maps in an apple orchard. *Precision Agriculture* 2010 12:1, 12(1), 118–129. <https://doi.org/10.1007/S11119-010-9161-X>
- AGRIBALYSE®. (2020). *AGRIBALYSE 3.0 | Agricultural and food database for French products and food LCA*. <https://simapro.com/products/agribalyse-agricultural-database/>
- Albiero, D., Paulo, R. L. de, Junior, J. C. F., Santos, J. da S. G., & Melo, R. P. (2020). Agriculture 4.0: a terminological introduction. *Revista Ciencia Agronomica*, 51(5), 1–8. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200083>
- Albrecht, S., Brandstetter, P., Beck, T., Fullana-I-Palmer, P., Grönman, K., Baitz, M., Deimling, S., Sandilands, J., Fischer, M., Albrecht, S., Brandstetter, P., Beck, T., Fullana-I-Palmer, P., Grönman, K., Baitz, M., Deimling, : S, Sandilands, J., & Fischer, M. (2013). An extended life cycle analysis of packaging systems for fruit and vegetable transport in Europe. *Int J Life Cycle Assess*, 18, 1549–1567. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0590-4>
- Alvarez, S., & Rubio, A. (2015). Compound method based on financial accounts versus process-based analysis in product carbon footprint: A comparison using wood pallets. *Ecological Indicators*, 49, 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.10.005>
- Alyaseri, I., & Zhou, J. (2019). Handling uncertainties inherited in life cycle inventory and life cycle impact assessment method for improved life cycle assessment of wastewater sludge treatment. *Heliyon*, 5(11), e02793. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2019.E02793>
- Antille, D. L., Chamen, T., Tullberg, J. N., Isbister, B., Jensen, T. A., Chen, G., Baillie, C. P., & Schueller, J. K. (2018). *Controlled traffic farming in precision agriculture*. *November* 2018, 239–270. <https://doi.org/10.19103/as.2017.0032.11>
- Arcese, G., Lucchetti, M. C., & Massa, I. (2017). Modeling Social Life Cycle Assessment framework for the Italian wine sector. *Journal of Cleaner Production*, 140, 1027–1036. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.137>
- AspenTech. (2013). *Aspen Economic Evaluation Family — Feature Availability*. <https://www.aspentech.com/en/products/pages/aspentech-economic-evaluation>

- Avola, G., Distefano, M., Torrisi, A., & Riggi, E. (2024). Precision agriculture and patented innovation: State of the art and current trends. *World Patent Information*, *76*, 102262. <https://doi.org/10.1016/j.wpi.2024.102262>
- Bacco, M., Brunori, G., Ferrari, A., Koltsida, P., & Toli, E. (2020). IoT as a Digital Game Changer in Rural Areas: The DESIRA Conceptual Approach. *GIoTS 2020 - Global Internet of Things Summit, Proceedings*, 0–5. <https://doi.org/10.1109/GIOTS49054.2020.9119674>
- Bacenetti, J., Paleari, L., Tartarini, S., Vesely, F. M., Foi, M., Movedi, E., Ravasi, R. A., Bellopede, V., Durello, S., Ceravolo, C., Amicizia, F., & Confalonieri, R. (2020). May smart technologies reduce the environmental impact of nitrogen fertilization? A case study for paddy rice. *Science of The Total Environment*, *715*, 136956. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.136956>
- Baillie, C. P., Lobsey, C. R., Antille, D. L., McCarthy, C. L., & Thomasson, J. A. (2018). A review of the state of the art in agricultural automation. Part III: Agricultural machinery navigation systems. *ASABE 2018 Annual International Meeting*, 2–10. <https://doi.org/10.13031/aim.201801591>
- Balafoutis, A., Beck, B., Fountas, S., Vangeyte, J., Van Der Wal, T., Soto, I., Gómez-Barbero, M., Barnes, A., & Eory, V. (2017). Precision agriculture technologies positively contributing to ghg emissions mitigation, farm productivity and economics. *Sustainability (Switzerland)*, *9*(8). <https://doi.org/10.3390/SU9081339>
- Bartl, K., Verones, F., & Hellweg, S. (2012). Life Cycle Assessment Based Evaluation of Regional Impacts from Agricultural Production at the Peruvian Coast. *Environ. Sci. Technol*, *46*, 8. <https://doi.org/10.1021/es301644y>
- Basset-Mens, C., Vannière, H., Grasselly, D., Heitz, H., Braun, A., Payen, S., Koch, P., & Biard, Y. (2016). Environmental impacts of imported and locally grown fruits for the French market: A cradle-to-farm-gate LCA study. *Fruits*, *71*(2), 93–104. <https://doi.org/10.1051/fruits/2015050>
- Basso, B., & Antle, J. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability*, *3*(4), 254–256. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0510-0>
- Bellvert, J., Mata, M., Vallverdú, X., Paris, C., & Marsal, J. (2020). Optimizing precision irrigation of a vineyard to improve water use efficiency and profitability by using a decision-oriented vine water consumption model. *Precision Agriculture 2020 22:2, 22(2)*, 319–341. <https://doi.org/10.1007/S11119-020-09718-2>
- Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). The Multiple Criteria Problem. *Multiple Criteria Decision Analysis*, 13–33. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4_2)
- Benoit-Norris, C., Cavan, D. A., & Norris, G. (2012). *Identifying Social Impacts in Product Supply Chains: Overview and Application of the Social Hotspot Database*. *4*, 1946–1965. <https://doi.org/10.3390/su4091946>
- Benoît-Norris, C., Vickery-Niederman, G., Valdivia, S., Franze, J., Traverso, M.,

- Ciroth, A., & Mazijn, B. (2011). Introducing the UNEP/SETAC methodological sheets for subcategories of social LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(7), 682–690. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0301-y>
- Benoit, C., Bennema, M., & Norris, G. (2019). THE SOCIAL HOTSPOTS DATABASE - Supporting documentation. *Design Assurance for Engineers and Managers*, 221–232. <https://doi.org/10.4324/9781003065319-13>
- Benoît, C., Traverso, M., & Finkbeiner, M. (2020). Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations. In *UN Environment Programme (UNEP)* (Issue 2).
- Berger, L. T., Doll, D., Lavelle, K., Skalky, M., & Spinelli, F. (2022). Sustainable ways to reduce pesticides in pome and stone fruit production. *Wip-Agri AGRICULTURE & INNOVATION*, 1–23.
- Berni, J. A. J., Zarco-Tejada, P. J., Suarez, L., & Fereres, E. (2009). Thermal and Narrowband Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring From an Unmanned Aerial Vehicle. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3), 722–738. <http://ieeexplore.ieee.org>.
- Beylot, A., Corrado, S., & Sala, S. (2020). Environmental impacts of European trade: interpreting results of process-based LCA and environmentally extended input–output analysis towards hotspot identification. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(12), 2432–2450. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01649-z>
- Blanc, S., Massaglia, S., Brun, F., Peano, C., Mosso, A., & Giuggioli, N. R. (2019). Use of bio-based plastics in the fruit supply chain: An integrated approach to assess environmental, economic, and social sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/su11092475>
- Blonk. (2023). *Agri-footprint Databases*. <https://www.blonksustainability.nl/tools-and-databases/agri-footprint>
- BOE. (1995). *Ley 31/1995, de prevención de Riesgos Laborales*. <https://www.boe.es/buscar/pdf/1995/BOE-A-1995-24292-consolidado.pdf>
- BOE. (1999). Real Decreto 1334/1999, Norma general de etiquetado, presentación y publicidad de los productos alimenticios. In *Boletín Oficial del Estado núm. 202* (pp. 31410–31418). <http://www.ayudaempresarial.es/archivos/1318258284.pdf>
- BOE. (2003). Ley Orgánica 11/1985, de 2 de agosto, de Libertad Sindical. *BOE.Es* - *BOE-A-1985-16660*, 37(276), 1–11. <https://www.boe.es/eli/es/lo/1985/08/02/11/con>
- BOE. (2007). *La Ley Orgánica para la igualdad efectiva de mujeres y hombres. 1*, 264–289.
- BOE. (2011). *Ley 17/2011, de seguridad alimentaria y nutrición*.
- BOE. (2019). *Ley 8/2019, de Medidas urgentes de protección social y de lucha contra la precariedad laboral en la jornada de trabajo*. [https://www.mites.gob.es/es/Guia/texto/guia\\_6/contenidos/guia\\_6\\_14\\_1.htm](https://www.mites.gob.es/es/Guia/texto/guia_6/contenidos/guia_6_14_1.htm)

- BOE. (2021a). *Real Decreto 817/2021, se fija el salario mínimo interprofesional para 2021*. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2021-15770>
- BOE. (2021b). *Real Decreto 1462/2018, se fija el salario mínimo interprofesional para 2019*. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2018-17773>
- Bohman, B. J., Rosen, C. J., & Mulla, D. J. (2019). Evaluation of variable rate nitrogen and reduced irrigation management for potato production. *Agronomy Journal*, *111*(4), 2005–2017. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.09.0566>
- Bosona, T., Gebresenbet, G., & Dyjakon, A. (2019). Implementing life cycle cost analysis methodology for evaluating agricultural pruning-to-energy initiatives. *Bioresource Technology Reports*, *6*(February), 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.02.006>
- Bulle, C., Margni, M., Patouillard, L., Boulay, A.-M., Bourgault, G., De Bruille, V., Cao, V., Hauschild, M., Henderson, A., Humbert, S., Kashef-Haghighi, S., Kounina, A., Laurent, A., Levasseur, A., Liard, G., Rosenbaum, R. K., Roy, P.-O., Shaked, S., Fantke, P., & Jolliet, O. (2019). LCIA OF IMPACTS ON HUMAN HEALTH AND ECOSYSTEMS IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *24*, 1653–1674. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0>
- Cacace, F., Bottani, E., Rizzi, A., & Vignali, G. (2020). *Evaluation of the economic and environmental sustainability of high pressure processing of foods*. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102281>
- Cadena, E., Rocca, F., Gutierrez, J. A., & Carvalho, A. (2019). Social life cycle assessment methodology for evaluating production process design: Biorefinery case study. *Journal of Cleaner Production*, *238*, 117718. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.117718>
- Camanzi, L., Alikadic, A., Compagnoni, L., & Merloni, E. (2017). The impact of greenhouse gas emissions in the EU food chain: A quantitative and economic assessment using an environmentally extended input-output approach. *Journal of Cleaner Production*, *157*, 168–176. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.118>
- Canaj, K., Mehmeti, A., & Berbel, J. (2021). *The Economics of Fruit and Vegetable Production Irrigated with Reclaimed Water Incorporating the Hidden Costs of Life Cycle Environmental Impacts*. <https://doi.org/10.3390/resources10090090>
- Canal Isabel II. (2021). *Tarifas*. [https://www.canaldeisabelsegunda.es/documents/20143/84800/Tarifas+2020\\_Canal+de+Isabel+II.pdf/a33151c1-17d2-e90a-dce3-baa1f2c7d511?t=1586796497808](https://www.canaldeisabelsegunda.es/documents/20143/84800/Tarifas+2020_Canal+de+Isabel+II.pdf/a33151c1-17d2-e90a-dce3-baa1f2c7d511?t=1586796497808)
- Carnerero, R. (2019). *Análisis de Ciclo de Vida. Cuantificación de los impactos ambientales*. FUNDECYT-PCTEX.
- Casamayor, J. L., Muñoz, E., Franchino, M., Gallego-Schmid, A., & Shin, H. D. (2024). Human-powered hydroponic systems: An environmental and economic assessment. *Sustainable Production and Consumption*, *46*(October 2023),

268–281. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.02.026>

- Castellani, V., Beylot, A., & Sala, S. (2019). Environmental impacts of household consumption in Europe: Comparing process-based LCA and environmentally extended input-output analysis. *Journal of Cleaner Production*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117966>
- Cavalett, O., Junqueira, T. L., Dias, M. O. S., Jesus, C. D. F., Mantelatto, P. E., Cunha, M. P., Franco, H. C. J., Cardoso, T. F., Filho, R. M., Rossell, C. E. V., & Bonomi, A. (2012). Environmental and economic assessment of sugarcane first generation biorefineries in Brazil. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 14(3), 399–410. <https://doi.org/10.1007/s10098-011-0424-7>
- Cetelen. (2023). *Aspectos generales sobre sostenibilidad y consumo - El Observatorio Cetelem*. <https://elobservatoriocetelem.es/sostenibilidad/sostenibilidad-y-consumo-2023/aspectos-generales-sobre-sostenibilidad-y-consumo/>
- CETM. (2022). *Precios del gasóleo, evolución mes a mes*. <https://www.cetm.es/evolucion-precios-gasoleo/>
- Chen, L., Wallhead, M., Reding, M., Horst, L., & Zhu, H. (2020). Control of insect pests and diseases in an ohio fruit farm with a laser-guided intelligent sprayer. *HortTechnology*, 30(2), 168–175. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH04497-19>
- Chen, W. H., & Holden, N. M. (2018). Tiered life cycle sustainability assessment applied to a grazing dairy farm. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 172, 1169–1179. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.264>
- Ciroth, A. (2009). Cost data quality considerations for eco-efficiency measures. *Ecological Economics*, 68(6), 1583–1590. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.08.005>
- Ciroth, A. (2016). *Life Cycle Costing and calculation of Value Added in openLCA* (Issue March, pp. 1–11). Greendelta.
- Ciroth, A., Duyan, Ö., & GREENDELTA. (2013). *Social Hot Spots Database in openLCA - Quick overview*. [https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2015/11/SHDB\\_in\\_openLCA.pdf](https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2015/11/SHDB_in_openLCA.pdf)
- Colaço, A. F., Molin, J. P., Molin, J. P., & Br, J. (2017). *Variable rate fertilization in citrus: a long term study*. 18, 169–191. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9454-9>
- Comisión Europea. (2023). *Digitalización de la agricultura y las zonas rurales en la UE*. [https://agriculture.ec.europa.eu/sustainability/digitalisation\\_es](https://agriculture.ec.europa.eu/sustainability/digitalisation_es)
- Conesa, M. R., Conejero, W., Vera, J., & Ruiz-Sánchez, M. C. (2021). Soil-based automated irrigation for a nectarine orchard in two water availability scenarios. In *Irrigation Science* (Vol. 39, Issue 4, pp. 421–439). <https://doi.org/10.1007/s00271-021-00736-0>
- Corrado, S., Castellani, V., Zampori, L., & Sala, S. (2018). Systematic analysis of

- secondary life cycle inventories when modelling agricultural production: A case study for arable crops. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3990–4000. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.03.179>
- Cos Terrer, J. (2017). Variedades de Melocotón y Nectarina: Mejora Genética. In *Imida*. [www.imida.es](http://www.imida.es)
- Costa, M. W., & Oliveira, A. A. M. (2022). Social life cycle assessment of feedstocks for biodiesel production in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112166. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112166>
- CRCC. (2022). *Precio del agua para riego*. <https://www.crcc.es/2021/06/14/nuevo-precio-del-agua-para-riego-14-junio-2021/>
- CropVue. (2024). *Sustainable Precision Farming - CropVue Technologies*. <https://www.cropvue.com/>
- CSR Laboratorio. (2023). *Catálogo de Análisis de Suelos Agrícolas* : <https://csrlaboratorio.es/laboratorio/agricultura/suelos-agricolas/catalogo-de-analisis-de-suelos-agricolas/>
- Curkovic, T., Contreras, A., Arraztio, D., Valenzuela, B., & Cayo, A. (2023). EVALUATION OF TRAPS FOR REMOTE SURVEILLANCE OF *Ceratitis capitata* Wiedemann (DIPTERA: TEPHRITIDAE) MALES IN PICA, CHILE. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences*, 39(1), 133–142. <https://doi.org/10.29393/CHJAA39-11ETTA50011>
- D'eusanio, M., Serreli, M., Zamagni, A., & Petti, L. (2018). *Assessment of social dimension of a jar of honey: A methodological outline*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.157>
- De la Rosa, J. M., Conesa, M. R., Domingo, R., Aguayo, E., Falagán, N., & Pérez-Pastor, A. (2016). Combined effects of deficit irrigation and crop level on early nectarine trees. *Agricultural Water Management*, 170, 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.01.012>
- De Luca, A. I., Falcone, G., Stillitano, T., Iofrida, N., Strano, A., & Gulisano, G. (2018). Evaluation of sustainable innovations in olive growing systems: A Life Cycle Sustainability Assessment case study in southern Italy. *Journal of Cleaner Production*, 171, 1187–1202. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.10.119>
- De Luca, A. I., Iofrida, N., Leskinen, P., Stillitano, T., Falcone, G., Strano, A., & Gulisano, G. (2017). Life cycle tools combined with multi-criteria and participatory methods for agricultural sustainability: Insights from a systematic and critical review. *Science of the Total Environment*, 595, 352–370. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.284>
- de Menna, F., Vittuari, M., & Molari, G. (2015). Impact evaluation of integrated food-bioenergy systems: A comparative LCA of peach nectar. *Biomass and Bioenergy*, 73, 48–61. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.12.004>
- Deery, D., Jimenez-Berni, J., Jones, H., Sirault, X., & Furbank, R. (2014). Proximal remote sensing buggies and potential applications for field-based phenotyping.

- In *Agronomy* (Vol. 4, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/agronomy4030349>
- Dekker, E., Zijp, M. C., van de Kamp, M. E., Temme, E. H. M., & van Zelm, R. (2020). A taste of the new ReCiPe for life cycle assessment: consequences of the updated impact assessment method on food product LCAs. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(12), 2315–2324. <https://doi.org/10.1007/S11367-019-01653-3/FIGURES/5>
- Del Monte. (2023). *Fruit Cup® Snacks: Diced Peaches in 100% Juice*. <https://www.delmontefoodservice.com/products/grab-go/del-monter-fruit-cupr-snacks-diced-peaches-100-juice>
- Dijkman, T. J., Basset-Mens, C., Assumpció Antón, & Montserrat Núñez. (2017). LCA of food and agriculture. *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*, 723–754. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3\\_29/TABLES/6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_29/TABLES/6)
- Dijkman, T. J., Birkved, M., & Hauschild, M. Z. (2012). PestLCI 2.0: A second generation model for estimating emissions of pesticides from arable land in LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(8), 973–986. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0439-2>
- Du, C., Ugaya, C., Freire, F., Dias, L. C., & Clift, R. (2019). Enriching the results of screening social life cycle assessment using content analysis: a case study of sugarcane in Brazil. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(4), 781–793. <https://doi.org/10.1007/S11367-018-1490-4/FIGURES/4>
- Duarte, R., Pinilla, V., & Serrano, A. (2014). The Spanish Food Industry on Global Supply Chains and Its Impact on Water Resources. *Water 2015, Vol. 7, Pages 132-152*, 7(1), 132–152. <https://doi.org/10.3390/W7010132>
- Dunuwila, P., Rodrigo, V. H. L., Daigo, I., & Goto, N. (2023). Social Sustainability of Raw Rubber Production: A Supply Chain Analysis under Sri Lankan Scenario. *Sustainability (Switzerland)*, 15(15), 11623. <https://doi.org/10.3390/su151511623>
- EC-JRC-IES. (2010). ILCD Handbook - General guide for Life Cycle Assessment. In *Constraints*. <https://doi.org/10.2788/38479>
- Ecochain. (2024). *Cradle-to-Grave in LCA – What is it & How does it work? / Ecochain*. <https://ecochain.com/blog/cradle-to-grave-in-lea/>
- ecoinvent. (2022). *Software Tools*. <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-association/software-tools/>
- ecoinvent. (2023). *ecoinvent Database*. <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>
- Ecoinvent. (2020). *Ecoinvent database 3.7*. [www.ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/data-releases/ecoinvent-3-7-1/](http://www.ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/data-releases/ecoinvent-3-7-1/)
- EEA. (2020). *Annual European Union greenhouse gas inventory 1990-2020 and inventory report 2022* (Issue May). <https://www.eea.europa.eu/publications/annual-european-union-greenhouse-gas-1>

- Egea, J. A., Caro, M., García-Brunton, J., Gambín, J., Egea, J., & Ruiz, D. (2022). Agroclimatic Metrics for the Main Stone Fruit Producing Areas in Spain in Current and Future Climate Change Scenarios: Implications From an Adaptive Point of View. *Frontiers in Plant Science*, *13*. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2022.842628/PDF>
- Eisfeldt, F. (2017). Soca v.1 add-on – Adding social impact information to ecoinvent. In *Greendelta* (Issue January). <https://nexus.openlca.org/ws/files/10153>
- El Chami, D., Knox, J. W., Daccache, A., & Weatherhead, E. K. (2019). Assessing the financial and environmental impacts of precision irrigation in a humid climate. *Horticultural Science*, *46*(1), 43–52. <https://doi.org/10.17221/116/2017-HORTSCI>
- Emami, N., Heinonen, J., Marteinsson, B., Säynäjoki, A., Junnonen, J. M., Laine, J., & Junnila, S. (2019). A Life Cycle Assessment of Two Residential Buildings Using Two Different LCA Database-Software Combinations: Recognizing Uniformities and Inconsistencies. *Buildings*, *9*(1). <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS9010020>
- Engström, R., Wadeskog, A., & Finnveden, G. (2006). *Environmental assessment of Swedish agriculture*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005>
- Entrena-Barbero, E., Tarpani, R. R. Z., Fernández, M., Moreira, M. T., & Gallego-Schmid, A. (2024). Integrating circularity as an essential pillar of dairy farm sustainability. *Journal of Cleaner Production*, *458*. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.142508>
- EPD. (2019a). Product Category Rule (PCR) - Fruits and Nuts - UN CPC 013. In *Environmental Product Declaration International AB: Vol. 1.01*. <https://www.environdec.com/PCR/Detail/?Pcr=14175>
- EPD. (2019b). *Product category rules (pcr) prepared and preserved vegetable and fruit products, including juice product category classification: un cpc 213, 214*. [www.environdec.com](http://www.environdec.com).
- Esnouf, A., Heijungs, R., Coste, G., Latrille, É., Steyer, J. P., & Hélias, A. (2019). A tool to guide the selection of impact categories for LCA studies by using the representativeness index. *Science of The Total Environment*, *658*, 768–776. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.12.194>
- Ess, D. R., Morgan, M. T., & Parsons, S. D. (2001). Implementing Site-Specific Management : Variable Rate Application. *Precision Agriculture, SSM-2 W*, 1–9.
- European Commission. (2021). Recommendation on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations. *Official Journal of the European Union*, *64*(20/01/2014), 1–28. <https://www.consilium.europa.eu/media/40928/st12791-en19.pdf>
- European Commission. (2022). *The EF 3.1. European Platform on LCA / EPLCA*. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.html>

- European Commission. (2023a). *Environmental Footprint database*. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/contactListEF.xhtml>
- European Commission. (2023b). *Industry 5.0 - European Commission*. [https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50\\_en#:~:text=The Industry 5.0 Award provides,centre of the production process.](https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en#:~:text=The Industry 5.0 Award provides,centre of the production process.)
- EXIOBASE. (2015). *About Exiobase*. <https://exiobase.eu/index.php/about-exiobase>
- FAO. (1996). *Enseñanzas de la revolución verde*. <https://www.fao.org/4/w2612s/w2612s06.htm>
- FAO. (1998). *Chapter 1 - Introduction to evapotranspiration Evapotranspiration process*. Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements. <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e04.htm>
- FAO. (2020). Realizing the Potential of Digitalization To Improve the Agri-Food System. *FAO*, 1–28. <http://www.wipo.int/amc/en/mediation/rules>
- Fazio, S., Biganzioli, F., De Laurentiis, V., Zampori, L., Sala, S., & Diaconu, E. (2018). *Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods*. <https://doi.org/10.2760/002447>
- FEPEX. (2024). *La producción de melocotón y nectarina en la UE aumentará un 4% esta campaña hasta 3,4 millones de toneladas*. Federación Española de Asociaciones de Productores Exportadores de Frutas, Hortalizas, Flores y Plantas Vivas. <https://www.fepex.es/noticias/detalle/produccion-melocoton-nectarina-UE-aumentara-4#:~:text=España%2C producirá cerca de 1,la media del 2018%2F2022.>
- Finkbeiner, M., Schau, E. M., Lehmann, A., & Traverso, M. (2010). *Towards Life Cycle Sustainability Assessment*, 2, 3309–3322. <https://doi.org/10.3390/su2103309>
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., & Suh, S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2009.06.018>
- Fiore, A., Lardo, E., Montanaro, G., Laterza, D., Loiudice, C., Berloco, T., Dichio, B., & Xiloyannis, C. (2018). Mitigation of global warming impact of fresh fruit production through climate smart management. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3634–3643. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.062>
- ForceA. (2024). *Optical leafclip meter DUALEX®*. [www.force-a.com](http://www.force-a.com)
- Frankowska, A., Jeswani, H. K., & Azapagic, A. (2019). Life cycle environmental impacts of fruits consumption in the UK. *Journal of Environmental Management*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.012>
- Fregonara, E., & Ferrando, D. G. (2023). The Discount Rate in the Evaluation of Project Economic-Environmental Sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/su15032467>

- García García, J. (2018). *Estructura de costes de las orientaciones productivas agrícolas de la Región de Murcia: frutales de hueso y cítricos*. 1–138.
- García, L., Parra, L., Jimenez, J. M., Parra, M., Lloret, J., Mauri, P. V., & Lorenz, P. (2021). Deployment strategies of soil monitoring wsn for precision agriculture irrigation scheduling in rural areas. *Sensors*, *21*(5), 1–30. <https://doi.org/10.3390/s21051693>
- Gasso, V., Oudshoorn, F. W., Sørensen, C. A. G., & Pedersen, H. H. (2014). An environmental life cycle assessment of controlled traffic farming. *Journal of Cleaner Production*, *73*, 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.044>
- Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision Agriculture and Food Security. *Science*, *327*(5967), 828–831. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1183899>
- Gmelin, H., & Seuring, S. (2014). Determinants of a sustainable new product development. *Journal of Cleaner Production*, *69*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2014.01.053>
- Goedkoop, de Beer, I., Harmens, R., Saling, P., Morris, D., Florea, A., & Whatelet, A. (2020). Methodology Report Product Social Impact Assessment-2020. In *Amersfoort, November 1st*. [www.product-social-impact-assessment.com](http://www.product-social-impact-assessment.com)
- Goedkoop, M. ., Indrane, D. ., & de Beer, I. M. . (2018). *Handbook for Product Social Impact Assessment*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33455.79523>
- Goedkoop, M., Heijungs, R., De Schryver, A., Struijs, J., & Van Zelm, R. (2009). *ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level First edition Report I: Characterisation Mark Huijbregts 3*.
- Goedkoop, M., Oele, M., Leijting, J., Ponsioen, T., & Meijer, E. (2016). *Introduction to LCA with SimaPro*.
- Golsteijn, L., & Vieira, M. (2020). Applicability of the European Environmental Footprint (EF) methodology in Southern Mediterranean countries—learnings and recommendations for enabling EF-compliant studies in regions outside of Europe. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *25*(12), 2407–2416. <https://doi.org/10.1007/S11367-019-01681-Z/TABLES/3>
- Gorthi, S., Chakraborty, S., Li, B., & Weindorf, D. C. (2020). A field-portable acoustic sensing device to measure soil moisture. *Computers and Electronics in Agriculture*, *174*(April), 105517. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105517>
- GreenDelta. (2022). *PSILCA*. <https://psilca.net/>
- GREENDELTA. (2023). *openLCA, professional Life Cycle Assessment (LCA) and footprint software*. <https://www.openlca.org/>
- Guinee, J. B. (2002). Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. *The International Journal of Life Cycle Assessment* *2002* *7*:5, *7*(5), 311–313. <https://doi.org/10.1007/BF02978897>
- Halliday, D. J., & Trenkel, M. E. (1992). *IFA World Fertilizer Manual*. Paris

(France) IFA.

- Han, S., Zhang, Q., Noh, H., & Shin, B. (2004). A DYNAMIC PERFORMANCE EVALUATION METHOD FOR DGPS RECEIVERS UNDER LINEAR PARALLEL-TRACKING APPLICATIONS. *Society*, 47(1), 321–329.
- Hardie, M. (2020). Review of novel and emerging proximal soil moisture sensors for use in agriculture. *Sensors (Switzerland)*, 20(23), 1–23. <https://doi.org/10.3390/s20236934>
- Hauschild, M. Z. (2018). Life Cycle Impact Assessment. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, 1–4. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7\\_16861-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16861-1)
- Heege, H. J. (2013). Precision in crop farming: Site specific concepts and sensing methods. In *Precision in Crop Farming: Site Specific Concepts and Sensing Methods: Applications and Results*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6760-7>
- Heijungs, R., Settanni, E., & Guinée, J. (2013). Toward a computational structure for life cycle sustainability analysis: Unifying LCA and LCC. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(9), 1722–1733. <https://doi.org/10.1007/S11367-012-0461-4/FIGURES/3>
- Herrera Almanza, A. M., & Corona, B. (2020). Using Social Life Cycle Assessment to analyze the contribution of products to the Sustainable Development Goals: a case study in the textile sector. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(9), 1833–1845. <https://doi.org/10.1007/S11367-020-01789-7/TABLES/4>
- HIDROGEA. (2021). *Compendio de tarifas - Agua y Alcantarillado*. <https://www.hidrogea.es/tarifas?>
- Hofstetter, P., Braunschweig, A., Mettler, T., Müller-Wenk, R., & Tietje, O. (1999). The mixing triangle: Correlation and graphical decision support for LCA-based comparisons. *Journal of Industrial Ecology*, 3(4), 97–115. <https://doi.org/10.1162/108819899569584>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2020). Correction to: ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(8), 1635. <https://doi.org/10.1007/S11367-020-01761-5/>
- Huijbregts, M., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F. M., Stam, G., Verones, F., Vieira, M. D. M., Zijp, M., & van Zelm, R. (2016). ReCiPe 2016 - A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterization. *National Institute for Public Health and the Environment*, 194. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0104.pdf>
- Hunkeler, D., Lichtenwort, K., & Rebitzer, G. (2008). Environmental life cycle costing. *Environmental Life Cycle Costing*, i–iv. <https://doi.org/10.1201/9781420054736/>

- Huppes, G., De Koning, A., Suh, S., Heijungs, R., Van Oers, L., Nielsen, P., & Guinée, J. B. (2006). Environmental impacts of consumption in the European Union: High-resolution input-output tables with detailed environmental extensions. *Journal of Industrial Ecology*, *10*(3), 129–146. <https://doi.org/10.1162/JIEC.2006.10.3.129>
- IDA. (2021). *Jobs and Economic Transformation / International Development Association - World Bank*. <https://ida.worldbank.org/en/topics/theme/jobs-and-economic-transformation>
- ILO. (2015). *International Labour Organization Statistics and Databases*. Website. <https://www.ilo.org/global/statistics-and-databases/lang-en/index.htm>
- INE. (2020). *Indice de Precios Industriales*. <https://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=27075>
- INE. (2021). *Personas de 16 a 74 años ocupadas o que trabajaron en el último año, según hayan tenido o no algún accidente durante la jornada laboral o en trayectos, por sexo y grupo de edad*. <https://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?tpx=48662>
- Ingrao, C., Matarazzo, A., Tricase, C., Clasadonte, M. T., & Huisinigh, D. (2015). Life Cycle Assessment for highlighting environmental hotspots in Sicilian peach production systems. *Journal of Cleaner Production*, *92*, 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.053>
- Iofrida, N., Stillitano, T., Falcone, G., Gulisano, G., Francesco Nicolò, B., & Irene De Luca, A. (2020). The socio-economic impacts of organic and conventional olive growing in Italy. *New Medit*, *19*(1), 117–131. <https://doi.org/10.30682/nm2001h>
- Iofrida, N., Strano, A., Gulisano, G., & De Luca, A. I. (2018). Why social life cycle assessment is struggling in development? *International Journal of Life Cycle Assessment*, *23*(2), 201–203. <https://doi.org/10.1007/S11367-017-1381-0/METRICS>
- IPCC. (2006a). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. In *Institute for Global Environmental Strategies (IGES)*, (Issue 1). <https://doi.org/10.35314/isi.v2i1.143>
- IPCC. (2006b). Guidelines for national greenhouse gas inventories: reference manual. In *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.
- IPCC. (2007). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In *Cambridge University Press, Cambridge*. <https://doi.org/10.1016/B978-008044910-4.00250-9>
- IPCC. (2019). Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. In *Research Handbook on Climate Change and Agricultural Law*. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2021/07/210714-IPCCJ7230-SRCL-Complete-BOOK-HRES.pdf>

- ISO 14040. (2006). Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. In *International organization for standardization*. <https://www.iso.org/standard/23151.html>
- ISO 14044. (2006). Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. In *International organization for standardization*.
- ISPA. (2024). *Precision Ag Definition International Society of Precision Agriculture*. Precision Agriculture Definition. <https://www.ispag.org/about/definition>
- Iswara, A. P., Farahdiba, A. U., Nadhifatin, E. N., Pirade, F., Andhikaputra, G., Mufliah, I., & Boedisantoso, R. (2020). A Comparative Study of Life Cycle Impact Assessment using Different Software Programs. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 506(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/506/1/012002>
- Ivie. (2024). *El sector agroalimentario aportó el 8,9% del PIB y el 11,3% del empleo a la economía española en 2023*. [https://www.ivie.es/es\\_ES/el-sector-agroalimentario-aporto-el-89-del-pib-y-el-113-del-empleo-a-la-economia-espanola-en-2023/#:~:text=En 2023%2C el sector agroalimentario,de 72.258 millones de euros](https://www.ivie.es/es_ES/el-sector-agroalimentario-aporto-el-89-del-pib-y-el-113-del-empleo-a-la-economia-espanola-en-2023/#:~:text=En 2023%2C el sector agroalimentario,de 72.258 millones de euros).
- Jeffrey, C., Bahan, K., Olynick, M., Richert, T., Shenouda, M., Sinha, A., Soar, P., Vance, K., Gerein, N., Verlaine Gakne, P., Bradley, D., Diep, J., Leedham, B., Munro, R., Tedford, J., Baldwin, L., Meijer, M., Junker, C., Pedersen, S., ... Heidinger, G. (2010). *AN INTRODUCTION TO GNSS - A primer in using Global Navigation Satellite Systems for positioning and autonomy*.
- Jiang, J. A., Tseng, C. L., Lu, F. M., Yang, E. C., Wu, Z. S., Chen, C. P., Lin, S. H., Lin, K. C., & Liao, C. S. (2008). A GSM-based remote wireless automatic monitoring system for field information: A case study for ecological monitoring of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel). *Computers and Electronics in Agriculture*, 62(2), 243–259. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2008.01.005>
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., & Rosenbaum, R. (2003). IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. In *International Journal of Life Cycle Assessment* (Vol. 8, Issue 6, pp. 324–330). <https://doi.org/10.1007/BF02978505>
- Jones, H. G., Stoll, M., Santos, T., Sousa, C. D., Chaves, M. M., & Grant, O. M. (2002). Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *Journal of Experimental Botany*, 53(378), 2249–2260. <https://doi.org/10.1093/JXB/ERF083>
- Kaebnick, H., Kara, S., & Sun, M. (2003). Sustainable product development and manufacturing by considering environmental requirements. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 19(6), 461–468. [https://doi.org/10.1016/S0736-5845\(03\)00056-5](https://doi.org/10.1016/S0736-5845(03)00056-5)
- Kalvani, S. R., Sharaai, A. H., Masri, M. F., Yunus, N. F. M., Afendi, M. R., &

- Uchechukwu, O. B. (2022). Social impact and social performance of paddy rice production in Iran and Malaysia. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 27(8), 1092–1105. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02083-4>
- Kate Prengaman. (2024). *The value of variable orchard inputs*. Good Fruit Grower. <https://www.goodfruit.com/the-value-of-variable-orchard-inputs/>
- Kitzes, J. (2013). An Introduction to Environmentally-Extended Input-Output Analysis. *Resources 2013, Vol. 2, Pages 489-503*, 2(4), 489–503. <https://doi.org/10.3390/RESOURCES2040489>
- Kloepffer, W. (2008). State-of-the-Art Life Cycle Sustainability Assessment of Products (LCSA). *Int J LCA*, 13(2), 89–95. <https://doi.org/10.1065/lca2008.02.376>
- Klopffer, W. (2003). Life-cycle based methods for sustainable product development. In *International Journal of Life Cycle Assessment* (Vol. 8, Issue 3, pp. 157–159). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/BF02978462>
- Kokemohr, L., Escobar, N., Mertens, A., Mosnier, C., Pirlo, G., Veysset, P., & Kuhn, T. (2022). Life Cycle Sustainability Assessment of European beef production systems based on a farm-level optimization model. *Journal of Cleaner Production*, 379. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134552>
- Lacasa, E., Santolaya, J. L., & Biedermann, A. (2016). Obtaining sustainable production from the product design analysis. *Journal of Cleaner Production*, 139, 706–716. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.08.078>
- Laurent, A., Weidema, B. P., Bare, J., Liao, X., Maia de Souza, D., Pizzol, M., Sala, S., Schreiber, H., Thonemann, N., & Verones, F. (2020). Methodological review and detailed guidance for the life cycle interpretation phase. *Journal of Industrial Ecology*, 24(5), 986–1003. <https://doi.org/10.1111/JIEC.13012>
- Lenzen, M. (2000). Errors in conventional and input-output-based life-cycle inventories. *Journal of Industrial Ecology*, 4(4), 127–148. <https://doi.org/10.1162/10881980052541981>
- Leontief, W. (1970). Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach. *The Review of Economics and Statistics*, 52(3), 262. <https://doi.org/10.2307/1926294>
- Liakos, V., Smith, E., Fountas, S., Nanos, G., Kalfountzos, D., & Gemtos, T. (2020). On-Farm Evaluation of Variable Rate Fertilizer Applications Using Yield-Based Mathematical Formulae in a Greek Apple Orchard. *International Journal of Fruit Science*, 20(S2), S48–S65. <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1702135>
- Life Cycle Initiative. (2017). *Life Cycle Initiative 2017-2022 Strategy document* (Issue October).
- Litskas, V., Mandoulaki, A., Vogiatzakis, I. N., Tzortzakis, N., & Stavriniades, M. (2020). Sustainable Viticulture: First Determination of the Environmental Footprint of Grapes. *Sustainability 2020, Vol. 12, Page 8812*, 12(21), 8812. <https://doi.org/10.3390/SU12218812>

- Lopes Silva, D. A., Nunes, A. O., Piekarski, C. M., da Silva Moris, V. A., de Souza, L. S. M., & Rodrigues, T. O. (2019). Why using different Life Cycle Assessment software tools can generate different results for the same product system? A cause–effect analysis of the problem. *Sustainable Production and Consumption*, *20*, 304–315. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2019.07.005>
- Lyle, S. D. (2013). Experiment to test RTK GPS with satellite “internet to tractor” for precision agriculture. *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems*, *4*(2), 1–13. <https://doi.org/10.4018/jaeis.2013040101>
- Maes, W. H., & Steppe, K. (2019). Perspectives for Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture. *Trends in Plant Science*, *24*(2), 152–164. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.007>
- Mahbub, N., Oyedun, A. O., Zhang, H., Kumar, A., & Poganietz, W. R. (2019). A life cycle sustainability assessment (LCSA) of oxymethylene ether as a diesel additive produced from forest biomass. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *24*(5), 881–899. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1529-6>
- Maita, F., & Maiolo, L. (2021). Low power Wireless Sensor Network for precision agriculture: A battery-less operation scenario. *2021 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry, MetroAgriFor 2021 - Proceedings*, 75–79. <https://doi.org/10.1109/METROAGRIFOR52389.2021.9628772>
- Majeau-Bettez, G., Strømman, A. H., & Hertwich, E. G. (2011). Evaluation of process- and input-output-based life cycle inventory data with regard to truncation and aggregation issues. *Environmental Science and Technology*, *45*(23), 10170–10177. <https://doi.org/10.1021/es201308x>
- Mancini, L., Valente, A., Barbero Vignola, G., Sanyé Mengual, E., & Sala, S. (2023). Social footprint of European food production and consumption. *Sustainable Production and Consumption*, *35*, 287–299. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2022.11.005>
- MAPA. (2022). *BALANCE DE CAMPAÑA 2021 DE FRUTA DE HUESO y PREVISIONES*. [https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/producciones-agricolas/balancedecampanafrutadehueso2021yprevisiones20224demayo2022\\_tcm30-619156.pdf](https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/producciones-agricolas/balancedecampanafrutadehueso2021yprevisiones20224demayo2022_tcm30-619156.pdf)
- MAPA. (2024). *Encuesta sobre Superficies y Rendimientos Cultivos (ESYRCE)*. <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadistica-digital/powerbi-esyrce.aspx>
- Martin-Gorriz, B., Gallego-Elvira, B., Martínez-Alvarez, V., & Maestre-Valero, J. F. (2020). Life cycle assessment of fruit and vegetable production in the Region of Murcia (south-east Spain) and evaluation of impact mitigation practices. *Journal of Cleaner Production*, *265*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121656>
- Martínez-blanco, J., Lehmann, A., Muñoz, P., Antón, A., Traverso, M., Rieradevall, J., & Finkbeiner, M. (2014). Application challenges for the social Life Cycle

- Assessment of fertilizers within life cycle sustainability assessment. *Journal of Cleaner Production*, 69, 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.044>
- MathWorks. (2021). *MatLab* Online. <https://www.es.mathworks.com/products/matlab-online.html>
- McFadden, J., Njuki, E., & Griffin, T. (2023). Precision Agriculture in the Digital Era: Recent Adoption on US Farms. *U.S. Department of Agriculture Economic Research Service, EIB-248(248)*, 46.
- Medel-Jiménez, F., Krexner, T., Gronauer, A., & Kral, I. (2024). Life cycle assessment of four different precision agriculture technologies and comparison with a conventional scheme. *Journal of Cleaner Production*, 434(June 2023). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140198>
- Medel-Jiménez, F., Piringner, G., Gronauer, A., Barta, N., Neugschwandtner, R. W., Krexner, T., & Kral, I. (2022). Modelling soil emissions and precision agriculture in fertilization life cycle assessment - A case study of wheat production in Austria. *Journal of Cleaner Production*, 380(August 2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134841>
- Medici, M., Canavari, M., & Toselli, M. (2020). Interpreting Environmental Impacts Resulting from Fruit Cultivation in a Business Innovation Perspective. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 9793, 12(23), 9793. <https://doi.org/10.3390/SU12239793>
- Michaliszyn-Gabryś, B., Bronder, J., & Krupanek, J. (2024). Social Life Cycle Assessment of Laser Weed Control System: A Case Study. *Sustainability (Switzerland)*, 16(6). <https://doi.org/10.3390/su16062590>
- Milà i Canals, L., Romanyà, J., & Cowell, S. J. (2007). Method for assessing impacts on life support functions (LSF) related to the use of “fertile land” in Life Cycle Assessment (LCA). *Journal of Cleaner Production*, 15(15), 1426–1440. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.05.005>
- Miller, R. E., & Blair, P. D. (2009). Input-output analysis: Foundations and extensions, second edition. In *Input-Output Analysis: Foundations and Extensions, Second Edition*. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511626982>
- MINCON/EC-JRC. (2022). *Sostenibilidad del consumo en España. Evaluación del impacto ambiental asociado a los patrones de consumo mediante Análisis del Ciclo de Vida*. [https://www.consumo.gob.es/es/system/tdf/prensa/Informe\\_de\\_Sostenibilidad\\_del\\_consumo\\_en\\_España\\_EU\\_MinCon.pdf?file=1&type=node&id=1126&force=](https://www.consumo.gob.es/es/system/tdf/prensa/Informe_de_Sostenibilidad_del_consumo_en_España_EU_MinCon.pdf?file=1&type=node&id=1126&force=)
- Miranda, M. Á., Barceló, C., Valdés, F., Feliu, J. F., Nestel, D., Papadopoulos, N., Sciarretta, A., Ruiz, M., & Alorda, B. (2019). Developing and implementation of decision support system (DSS) for the control of olive fruit fly, *bactrocera oleae*, in mediterranean olive orchards. *Agronomy*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/agronomy9100620>
- Mirás-Avalos, J. M., Pérez-Sarmiento, F., Alcobendas, R., Alarcón, J. J., Mounzer, O., & Nicolás, E. (2016). Using midday stem water potential for scheduling

- deficit irrigation in mid-late maturing peach trees under Mediterranean conditions. *Irrigation Science*, 34(2), 161–173. <https://doi.org/10.1007/S00271-016-0493-9/TABLES/5>
- Misra, N. N., Dixit, Y., Al-Mallahi, A., Bhullar, M. S., Upadhyay, R., & Martynenko, A. (2022). IoT, Big Data, and Artificial Intelligence in Agriculture and Food Industry. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(9), 6305–6324. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2998584>
- MITECO. (2023, January 23). *2022 continúa la tendencia y se posiciona como el año más cálido en España desde que hay registros*. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/2022-continúa-la-tendencia-y-se-posiciona-como-el-año-más-cálido-en-españa-desde-que-hay-registros-/tcm:30-552267>
- MITMA. (2021, July). *Observatorio de costes del transporte de mercancías por carretera*. [https://www.mitma.gob.es/recursos\\_mfom/listado/recursos/observatorio\\_de\\_costes\\_julio\\_2020.pdf](https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/listado/recursos/observatorio_de_costes_julio_2020.pdf)
- MMM Tech Support. (2024). *Cámara Scholander PMS* - . <https://mmm-tech.de/index.php/es/scholanderchambers/pms>
- ModpoW. (2023). *AgriTechnologies*. <https://www.modpowagritech.com/campaigns/landing-202107c/>
- Moins, B., France, C., Van den bergh, W., & Audenaert, A. (2020). Implementing life cycle cost analysis in road engineering: A critical review on methodological framework choices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 110284. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.110284>
- Monaghan, J. M., Daccache, A., Vickers, L. H., Hess, T. M., Weatherhead, E. K., Grove, I. G., & Knox, J. W. (2013). More “crop per drop”: Constraints and opportunities for precision irrigation in European agriculture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(5), 977–980. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6051>
- Mounzer, O. H., Vera, J., Tapia, L. M., García-Orellana, Y., Conejero, W., Abrisqueta, I., Ruiz-Sánchez, M. C., & Abrisqueta-García, J. M. (2008). Irrigation scheduling of peach trees (*Prunus persica* L.) by continuous measurement of soil water status. *Agrociencia*, 42(8).
- Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358–371. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>
- Murray, J., & Wood, R. (2010). *The Sustainability Practitioner’s Guide to Input-Output Analysis*. Common Ground Publishing LLC.
- Nackley, L. L., Warneke, B., Fessler, L., Pscheidt, J. W., Lockwood, D., Wright, W. C., Sun, X., & Fulcher, A. (2021). Variable-rate Spray Technology Optimizes Pesticide Application by Adjusting for Seasonal Shifts in Deciduous Perennial Crops. *HortTechnology*, 1450(August). <https://doi.org/10.21273/HORTTECH04794-21>

- Neves, M. F., Casagrande, B. P., Cambaúva, V., Teixeira, G. D. O., Junqueira, P., & Toledo, F. (2023). *Agriculture 6.0: a new proposal for the future of agribusiness*. 1–16.
- Nieder-Heitmann, M., Haigh, K. F., & Görgens, J. F. (2019). Life cycle assessment and multi-criteria analysis of sugarcane biorefinery scenarios: Finding a sustainable solution for the South African sugar industry. *Journal of Cleaner Production*, *239*. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.118039>
- Nzila, C., Dewulf, J., Spanjers, H., Tuigong, D., Kiriamiti, H., & van Langenhove, H. (2012). Multi criteria sustainability assessment of biogas production in Kenya. *Applied Energy*, *93*, 496–506. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2011.12.020>
- O'Brien, D., Hennessy, T., Moran, B., & Shalloo, L. (2015). Relating the carbon footprint of milk from Irish dairy farms to economic performance. *Journal of Dairy Science*, *98*(10), 7394–7407. <https://doi.org/10.3168/JDS.2014-9222>
- O'mahony, T. (2021). Cost-benefit analysis in a climate of change: setting social discount rates in the case of Ireland. *Green Finance*, *3*(2), 175–197. <https://doi.org/10.3934/GF.2021010>
- OECD. (2019). Digital Opportunities for Better Agricultural Policies. In *Digital Opportunities for Better Agricultural Policies*. OECD. <https://doi.org/10.1787/571a0812-en>
- Öko-Institut. (1987). *Produktlinienanalyse: Bedürfnisse, Produkte und ihre Folgen*. Kölner Volksblattverlag. Kölner Volksblatt Verl.
- Oliveira, D. F. de, & Souza, R. G. de. (2023). Life cycle sustainability impact categories for sustainable procurement. *Journal of Cleaner Production*, *383*, 135448. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135448>
- Omran, N., Hamzah Sharaai, A., & Hariza Hashim, A. (2021). *Visualization of the Sustainability Level of Crude Palm Oil Production: A Life Cycle Approach*. <https://doi.org/10.3390/su13041607>
- Ortuani, B., Facchi, A., Mayer, A., Bianchi, D., Bianchi, A., & Brancadoro, L. (2019). *Assessing the Effectiveness of Variable-Rate Drip Irrigation on Water Use Efficiency in a Vineyard in Northern Italy*. <https://doi.org/10.3390/w11101964>
- Oshunsanya, S. O., Oluwasemire, K. O., & Taiwo, O. J. (2017). Use of GIS to Delineate Site-Specific Management Zone for Precision Agriculture. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *48*(5), 565–575. <https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1270298>
- Osterman, A., Godeša, T., Hočevár, M., Širok, B., & Stopar, M. (2013). Real-time positioning algorithm for variable-geometry air-assisted orchard sprayer. *Computers and Electronics in Agriculture*, *98*, 175–182. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2013.08.013>
- Padilla, F. M., Gallardo, M., Peña-Fleitas, M. T., De Souza, R., & Thompson, R. B. (2018). Proximal optical sensors for nitrogen management of vegetable crops:

- A review. *Sensors (Switzerland)*, *18*(7), 1–23.  
<https://doi.org/10.3390/s18072083>
- Palleja, T., & Landers, A. J. (2015). Real time canopy density estimation using ultrasonic envelope signals in the orchard and vineyard. *Computers and Electronics in Agriculture*, *115*, 108–117.  
<https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2015.05.014>
- Peixoto, R. (2024). *Modern agriculture: integration of economic efficiency, social responsibility, and environmental sustainability*. Center for Advanced Studies on Applied Economics; Imagenet Tecnologia.  
<https://www.cepea.esalq.usp.br/en/modern-agriculture-integration-of-economic-efficiency-social-responsibility-and-environmental-sustainability.aspx>
- Pergola, M., Persiani, A., D'Ammaro, D., Pastore, V., D'Adamo, C., Palese, A. M., & Celano, G. (2022). Environmental and Energy Analysis of Two Orchard Systems: A Case Study in Mediterranean Environment. *Agronomy*, *12*(10).  
<https://doi.org/10.3390/agronomy12102556>
- Pergola, M., Persiani, A., Pastore, V., Palese, A. M., Arous, A., & Celano, G. (2017). A comprehensive Life Cycle Assessment (LCA) of three apricot orchard systems located in Metapontino area (Southern Italy). *Journal of Cleaner Production*, *142*, 4059–4071. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.030>
- Pini, M., Marucco, G., Falco, G., Nicola, M., & De Wilde, W. (2020). Experimental Testbed and Methodology for the Assessment of RTK GNSS Receivers Used in Precision Agriculture. *IEEE Access*, *8*, 14690–14703.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2965741>
- Polymeni, S., Plastras, S., Skoutas, D. N., Kormentzas, G., & Skianis, C. (2023). The Impact of 6G-IoT Technologies on the Development of Agriculture 5.0: A Review. *Electronics (Switzerland)*, *12*(12).  
<https://doi.org/10.3390/electronics12122651>
- Prasara-A, J., & Gheewala, S. H. (2021). An assessment of social sustainability of sugarcane and cassava cultivation in Thailand. *Sustainable Production and Consumption*, *27*, 372–382. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.11.009>
- PRé Sustainability. (2023). *SimaPro El software líder en ACV*.  
<https://network.simapro.com/cadis/>
- PROBODELT. (2023). *Captura masiva -Frutales de hueso (albaricoque, nectarina, melocotón, ciruela) - Tienda Online Probodelt*.  
<https://tienda.probodelt.com/cultivos/frutales-de-hueso-albaricoque-nectarina-melocoton-ciruela/>
- Qin, Y., & Suh, S. (2021). Method to decompose uncertainties in LCA results into contributing factors. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *26*(5), 977–988. <https://doi.org/10.1007/S11367-020-01850-5/TABLES/1>
- Rama, M., Entrena-Barbero, E., Dias, A. C., Moreira, M. T., Feijoo, G., & González-García, S. (2021). Evaluating the carbon footprint of a Spanish city through environmentally extended input output analysis and comparison with life

- cycle assessment. *Science of the Total Environment*, 762, 143133. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143133>
- Ramírez-Cuesta, J. M., Ortuño, M. F., Gonzalez-Dugo, V., Zarco-Tejada, P. J., Parra, M., Rubio-Asensio, J. S., & Intrigliolo, D. S. (2022). Assessment of peach trees water status and leaf gas exchange using on-the-ground versus airborne-based thermal imagery. *Agricultural Water Management*, 267, 107628. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2022.107628>
- Ramos Huarachi, D. A., Piekarski, C. M., Puglieri, F. N., & de Francisco, A. C. (2020). Past and future of Social Life Cycle Assessment: Historical evolution and research trends. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121506. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.121506>
- Rashedi, A., & Khanam, T. (2020). Life cycle assessment of most widely adopted solar photovoltaic energy technologies by mid-point and end-point indicators of ReCiPe method. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(23), 29075–29090. <https://doi.org/10.1007/S11356-020-09194-1/FIGURES/9>
- Rebitzer, G., & Hunkeler, D. (2003). Life cycle costing in LCM: Ambitions, opportunities, and limitations - Discussing a framework. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(5), 253–256. <https://doi.org/10.1007/BF02978913/METRICS>
- Redagrícola. (2017). *Los fundamentos de la geolocalización y navegación - Redagrícola*. <https://redagricola.com/los-fundamentos-de-la-geolocalizacion-y-navegacion/>
- REE. (2021). *Mercados y precios electricidad*. Red Eléctrica de España. <https://www.esios.ree.es/es/pvpc?date=15-07-2021>
- RepRisk. (2022). *RepRisk / World's largest ESG technology company*. [https://www.reprisk.com/?mtm\\_campaign=brand&mtm\\_kwd=UK&mtm\\_source=google&mtm\\_medium=cpc&mtm\\_cid=01&gad\\_source=1&gclid=CjwKCAiAzJOtBhALEiwAtwj8tv7mQclv2R7Kdbx8w\\_04ov1ZFqkSJsu5wPY8mDyr3wVKfHj4cHoGZBoCkTAQAvD\\_BwE](https://www.reprisk.com/?mtm_campaign=brand&mtm_kwd=UK&mtm_source=google&mtm_medium=cpc&mtm_cid=01&gad_source=1&gclid=CjwKCAiAzJOtBhALEiwAtwj8tv7mQclv2R7Kdbx8w_04ov1ZFqkSJsu5wPY8mDyr3wVKfHj4cHoGZBoCkTAQAvD_BwE)
- RETEMA. (2020). *España es el país de la Unión Europea que más residuos deposita en los vertederos*. Revista Técnica de Medio Ambiente. <https://www.retema.es/actualidad/espana-es-pais-union-europea-mas-residuos-deposita-vertederos>
- Reynolds, C. J., Piantadosi, J., Buckley, J. D., Weinstein, P., & Boland, J. (2015). Evaluation of the environmental impact of weekly food consumption in different socio-economic households in Australia using environmentally extended input-output analysis. *Ecological Economics*, 111, 58–64. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.01.007>
- Rivera-Huerta, A., Lozano, M. de la S. R., Padilla-Rivera, A., & Güereca, L. P. (2019). Social Sustainability Assessment in Livestock Production: A Social Life Cycle Assessment Approach. *Sustainability 2019, Vol. 11, Page 4419, 11(16)*, 4419. <https://doi.org/10.3390/SU11164419>
- Roitbarg, H. A. (2021). Factors behind the price increase in the agricultural sector

- at the beginning of the twenty-first century: Rent, wages, oil and productivity. *Desarrollo y Sociedad*, 2021(88), 169–199. <https://doi.org/10.13043/DYS.88.5>
- Román, C., Arnó, J., & Planas, S. (2021). Map-based zonal dosage strategy to control yellow spider mite (*Eotetranychus carpini*) and leafhoppers (*Empoasca vitis* & *Jacobiasca lybica*) in vineyards. *Crop Protection*, 147, 105690. <https://doi.org/10.1016/J.CROPRO.2021.105690>
- Rosegrant, M. W., Wong, B., Sulser, T. B., Dubosse, N., & Lybbert, T. J. (2023). *Benefit-Cost Analysis of Increased Funding for Agricultural Research and Development in the Global South*. <https://doi.org/10.1017/bca.2023.27>
- Rossel, R. A. V., & Adamchuk, V. I. (2013). Proximal soil sensing. *Taylor and Francis Ltd*, 5, 9780203128329(February), 99–118. <https://doi.org/10.4324/9780203128329>
- Rovira-Más, F., Saiz-Rubio, V., Cuenca, A., Ortiz, C., Teruel, M. P., & Ortí, E. (2024). Open-Format Prescription Maps for Variable Rate Spraying in Orchard Farming. *Journal of the ASABE*, 67(2), 11–25. <https://doi.org/10.13031/ja.15750>
- Russo Garrido, S., Parent, J., Beaulieu, L., & Revéret, J. P. (2016). A literature review of type I SLCA—making the logic underlying methodological choices explicit. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(3), 432–444. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1067-z>
- Saade, M. R. M., Gomes, V., da Silva, M. G., Ugaya, C. M. L., Lasvaux, S., Passer, A., & Habert, G. (2019). Investigating transparency regardingecoinvent users' system model choices. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(1), 1–5. <https://doi.org/10.1007/S11367-018-1509-X/FIGURES/2>
- Sala, S., Laurent, A., Vieira, M., & Van Hoof, G. (2020). Implications of LCA and LCIA choices on interpretation of results and on decision support. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(12), 2311–2314. <https://doi.org/10.1007/S11367-020-01845-2/TABLES/1>
- Salas, J., Vega, H., Ortiz, J., Bustos, R., & Lozoya, C. (2014). Implementation analysis of GPRS communication for precision agriculture. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 3903–3908. <https://doi.org/10.1109/IECON.2014.7049083>
- Saouter, E., Biganzoli, F., Pant, R., Sala, S., & Versteeg, D. (2019). Using REACH for the EU Environmental Footprint: Building a Usable Ecotoxicity Database, Part I. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 15(5), 783–795. <https://doi.org/10.1002/IEAM.4168>
- Savian, M., da Penha Simon, C., & Holden, N. M. (2023). Evaluating environmental, economic, and social aspects of an intensive pig production farm in the south of Brazil: a case study. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1, 1–17. <https://doi.org/10.1007/S11367-023-02223-4/FIGURES/6>
- Seedmech. (2024). *Senor de agua Yara*. <https://www.seedmech.com/producto/sensor-de-agua-yara/>

- semios. (2024). *Automated Insect Camera Traps - Semios*. <https://semios.com/our-hardware/automated-camera-traps/>
- Sendra, S. (2023). *Keynote Speech 4: Digital Transition in Precision Agriculture*. 4–4. <https://doi.org/10.1109/ICCNS58795.2023.10193313>
- SETAC. (1993). Guidelines for Life-Cycle Impact Assessment: Code of Practice. *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*, 1(April), 73. <https://www.setac.org/resource/guidelines-lca-code-practice-1993.html>
- Shaikh, M. A., Hadjikakou, M., & Bryan, B. A. (2022). Shared responsibility for global water stress from agri-food production and consumption and opportunities for mitigation. *Journal of Cleaner Production*, 379(P1), 134628. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134628>
- Sharma, S., & Srushtideep, A. (2022). Precision Agriculture and Its Future. *International Journal of Plant & Soil Science*, December, 200–204. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2022/v34i242630>
- SHDB. (2019). *SHDB - Home*. <http://www.socialhotspot.org/>
- SHDB. (2022). *About Social hotspot data base*. <http://www.socialhotspot.org/about-shdb.html>
- SIAM. (2020). *Sistema de Información Agraria de Murcia*. <http://siam.imida.es/apex/f?p=101:1:660534674714209::NO::>
- Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing*, 12(19), 1–31. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>
- Som Energia. (2022a). *Histórico de Tarifas de Electricidad*. <https://www.somenergia.coop/es/tarifas-de-electricidad/historico-de-tarifas-de-electricidad/>
- Som Energia. (2022b). *Tarifas de Electricidad*. <https://www.somenergia.coop/es/tarifas-de-electricidad/#precios-30td-con-impuestos>
- Sphera. (2023). *Software de evaluación del ciclo de vida (GaBi)*. <https://sphera.com/software-de-evaluacion-del-ciclo-de-vida-lca/?lang=es>
- Sphera. (2024). *Product Sustainability Data Search / Sphera (GaBi)*. <https://sphera.com/product-sustainability-gabi-data-search/>
- Spisic, J., Balen, J., Zagar, D., & Galić, V. (2022). IoT Based Network Model And Sensor Node Prototype For Precision Agriculture Application. *2022 IEEE 8th World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2022*. <https://doi.org/10.1109/WF-IOT54382.2022.10152218>
- Suppen, N. (2013). *What is LCA? ISO overview*.
- Sureau, S., Neugebauer, S., & Achten, W. M. J. (2020). Different paths in social life cycle impact assessment (S-LCIA)—a classification of type II impact pathway approaches. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(2), 382–393. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01693-9>

- Tamburini, E., Pedrini, P., Marchetti, M. G., Fano, E. A., & Castaldelli, G. (2015). *Life Cycle Based Evaluation of Environmental and Economic Impacts of Agricultural Productions in the Mediterranean Area*. 7, 2915–2935. <https://doi.org/10.3390/su7032915>
- TAMIC. (2022). *Medida y Control / TAMIC, S.L.* <http://www.tamic.es/es/>
- Tecco, N., Baudino, C., Girgenti, V., & Peano, C. (2016). Innovation strategies in a fruit growers association impacts assessment by using combined LCA and s-LCA methodologies. *Science of the Total Environment*, 568, 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.203>
- Többen, J., Wiebe, K. S., Verones, F., Wood, R., & Moran, D. D. (2018). A novel maximum entropy approach to hybrid monetary-physical supply-chain modelling and its application to biodiversity impacts of palm oil embodied in consumption. *Environmental Research Letters*, 13(11), 115002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AAE491>
- Trapview. (2024). *Monitoreo y Pronóstico de Plagas - Manejo Integrado de Plagas.* <https://trapview.com/es/>
- Traverso, M. (2018). Is social life cycle assessment really struggling in development or is it on a normal path towards harmonization/standardization? *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(2), 199–200. <https://doi.org/10.1007/S11367-017-1387-7/METRICS>
- Trivelli, L., Apicella, A., Chiarello, F., Rana, R., Fantoni, G., & Tarabella, A. (2019). From precision agriculture to Industry 4.0: Unveiling technological connections in the agrifood sector. *British Food Journal*, 121(8), 1730–1743. <https://doi.org/10.1108/BFJ-11-2018-0747>
- UFZ. (2021). *RESPONSA - a Regional specific contextualised social life cycle assessment.* <https://www.ufz.de/index.php?en=40035>
- UNEP. (2009). Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products. In *Management* (Vol. 15, Issue 2). [http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1164xPA-guidelines\\_sLCA.pdf](http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1164xPA-guidelines_sLCA.pdf)
- UNEP. (2011). *Towards a Life Cycle Sustainability Assessment.* <https://doi.org/DTI/1412/PA>
- UNEP. (2013). The methodological sheets for sub-categories in social life cycle assessment (S-LCA). *Pre Publication- Version. The Methodological Sheets for Subcategories in Social Life Cycle Assessment (S-LCA).*, 152.
- UNEP. (2016). *Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators Volume 1.*
- UNEP. (2020). Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products. *Management*, 15(2), 104. [http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1164xPA-guidelines\\_sLCA.pdf](http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1164xPA-guidelines_sLCA.pdf)
- UNEP. (2021). *Methodological Sheets for Subcategories in Social Life Cycle*

- Assessment (S-LCA ) 2021*. (Issue December).
- UNEP Setac Life Cycle Initiative. (2022). Pilot projects on Guidelines for SOCIAL LIFE CYCLE ASSESSMENT OF PRODUCTS AND ORGANIZATIONS 2022. In *Management*. [http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1164xPA-guidelines\\_sLCA.pdf](http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1164xPA-guidelines_sLCA.pdf)
- UNESCO Archives. (2022). *Dinámica de la revolución neolítica - Enciclopedia de la Historia del Mundo*. <https://www.worldhistory.org/trans/es/2-1937/dinamica-de-la-revolucion-neolitica/>
- USDA. (2018). *Soil Survey Manual Soil* (Vol. 18).
- Usubiaga-Liaño, A., Behrens, P., & Daioglou, V. (2020). Energy use in the global food system. *Journal of Industrial Ecology*, 24(4), 830–840. <https://doi.org/10.1111/jiec.12982>
- Valente, A., Iribarren, D., & Dufour, J. (2019). *Life cycle sustainability assessment of hydrogen from biomass gasification: A comparison with conventional hydrogen*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.105>
- Vatsanidou, A., Fountas, S., Liakos, V., Nanos, G., & Katsoulas, N. (2020). *Life Cycle Assessment of Variable Rate Fertilizer Application in a Pear Orchard*. <https://doi.org/10.3390/su12176893>
- Vatsanidou, A., Nanos, G. D., Fountas, S., Baras, J., Castrignano, A., & Gemtos, T. A. (2017). Nitrogen replenishment using variable rate application technique in a small hand-harvested pear orchard. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 15(4). <https://doi.org/10.5424/sjar/2017154-10986>
- Vavra, J., Munzarova, S., & Bednarikova, M. (2015). Assessment of social impacts of chemical and food products in the Czech Republic. In *Social Life Cycle Assessment* (pp. 147–197). Springer.
- Vera, J., Abrisqueta, I., Conejero, W., & Ruiz-Sánchez, M. C. (2017). Precise sustainable irrigation: A review of soil-plant-atmosphere Monitoring. *Acta Horticulturae*, 1150, 195–200. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1150.28>
- Verhulst, N., & Govaerts, B. (2010). The normalized difference vegetation index (NDVI) GreenSeeker handheld sensor: Toward the integrated evaluation of crop management Part A. *CIMMYT*, 16. <https://repository.cimmyt.org/bitstream/handle/10883/550/94192.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Veris CoreScan™. (n.d.). *Soil Sensor Probe / Carbon, Soil Health and Agronomy — Soil Scanning Sensors for Agriculture*. Retrieved September 16, 2024, from <https://www.veristech.com/corescan>
- Vinyes, E., Asin, L., Alegre, S., Muñoz, P., Boschmonart, J., & Gasol, C. M. (2017). Life Cycle Assessment of apple and peach production, distribution and consumption in Mediterranean fruit sector. *Journal of Cleaner Production*, 149, 313–320. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.102>
- Vinyes, E., Gasol, C. M., Asin, L., Alegre, S., & Muñoz, P. (2015). Life Cycle

- Assessment of multiyear peach production. *Journal of Cleaner Production*, 104, 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.041>
- Visser, W., & Brundtland, G. H. (1987). Report of the World Commission on Environment and Development Our Common Future. In *The Top 50 Sustainability Books*. [https://doi.org/10.9774/gleaf.978-1-907643-44-6\\_12](https://doi.org/10.9774/gleaf.978-1-907643-44-6_12)
- Wang, W., Wang, Y., Cai, L., & Xing, X. (2024). Variable-Rate Fertilization in a Custard Apple (*Annona squamosa* L.) Orchard Based On the Spatial Variability of Soil Nutrients. *Applied Fruit Science*, 66(3), 803–812. <https://doi.org/10.1007/s10341-024-01095-8>
- Wei, Z., Xue, X., Salcedo, R., Zhang, Z., Gil, E., Sun, Y., Li, Q., Shen, J., He, Q., Dou, Q., & Zhang, Y. (2023). Key Technologies for an Orchard Variable-Rate Sprayer: Current Status and Future Prospects. *Agronomy*, 13(1), 1–25. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010059>
- Weidema, B. P., & Wesnæs, M. S. (1996). Data quality management for life cycle inventories—an example of using data quality indicators. *Journal of Cleaner Production*, 4(3–4), 167–174. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(96\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(96)00043-1)
- Weiss, M., Jacob, F., & Duveiller, G. (2020). Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sensing of Environment*, 236(August). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402>
- Wiebe, K. S., Bjelle, E. L., Többen, J., & Wood, R. (2018). Implementing exogenous scenarios in a global MRIO model for the estimation of future environmental footprints. *Journal of Economic Structures*, 7(1), 1–18. <https://doi.org/10.1186/S40008-018-0118-Y/FIGURES/5>
- Willersinn, C., Mouron, P., Mack, G., & Siegrist, M. (2017). Food loss reduction from an environmental, socio-economic and consumer perspective – The case of the Swiss potato market. *Waste Management*, 59, 451–464. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.007>
- Wilson, A. R., Vasile, M., Maddock, C., & Baker, K. (2023). Implementing life cycle sustainability assessment for improved space mission design. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 19(4), 1002–1022. <https://doi.org/10.1002/IEAM.4722>
- WMO. (2003). Scientific assessment of ozone depletion: 2002. In *World Meteorological Organization*. World Meteorological Organization ; <https://digitallibrary.un.org/record/762855>
- Wood, R., Stadler, K., Bulavskaya, T., Lutter, S., Giljum, S., De Koning, A., Kuenen, J., Schütz, H., Acosta-Fernández, J., & Usubiaga, A. (2015). Global sustainability accounting—Developing EXIOBASE for multi-regional footprint analysis. *Sustainability*, 7(1), 138–163.
- Xu, Y., Wang, L., Li, K., Wei, L., Chen, C., Xiang, L., Cai, J., & Wang, Z. (2024). Multi-tier life cycle assessment for evaluating low carbon strategies in soil remediation. *Environmental Impact Assessment Review*, 106(September 2023), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107491>

- Yang, S., Ma, K., Liu, Z., Ren, J., & Man, Y. (2019). Development and applicability of life cycle impact assessment methodologies. In *Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making: Methodologies and Case Studies*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818355-7.00005-1>
- Yunxiao, Wei, Chao, Han, Zuolong, & Yu. (2023). An environment safety monitoring system for agricultural production based on artificial intelligence, cloud computing and big data networks. *Journal of Cloud Computing*, *12*(1), 1–17. <https://doi.org/10.1186/s13677-023-00463-1>
- Zamagni, A., Zanchi, L., Cesare, S. Di, Silveri, F., & Petti, L. (2021). Theory and Practice on Social Life Cycle Assessment. *Life Cycle Engineering and Management of Products: Theory and Practice*, 143–168. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-78044-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-78044-9_7)
- Zaman, Q. U., Schumann, A. W., & Miller, W. M. (2005). Variable rate nitrogen application in Florida citrus based on ultrasonically-sensed tree size. *Applied Engineering in Agriculture*, *21*(3), 331–335.
- Zampori, L., & Pant, R. (2019). Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method. In *Publications Office of the European Union*. <https://doi.org/10.2760/424613>
- Zanni, S., Awere, E., & Bonoli, A. (2020). Life cycle sustainability assessment: An ongoing journey. In *Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making: Methodologies and Case Studies*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818355-7.00004-X>
- Zeug, W., Bezama, A., & Thrän, D. (2022). Application of holistic and integrated LCSA: Case study on laminated veneer lumber production in Central Germany. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *27*(12), 1352–1375. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02098-x>
- Zeug, W., Raquel, K., Yupanqui, G., Bezama, A., & Thrän, D. (2023). Holistic and integrated life cycle sustainability assessment of prospective biomass to liquid production in Germany. *Journal of Cleaner Production*, *418*, 959–6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138046>
- Zhang, F., Zhang, Y., Lu, W., Gao, Y., Gong, Y., & Cao, J. (2022). 6G-Enabled Smart Agriculture: A Review and Prospect. *Electronics (Switzerland)*, *11*(18), 1–23. <https://doi.org/10.3390/electronics11182845>
- Zira, S., Rööös, E., Rydhmer, L., & Hoffmann, R. (2023). Sustainability assessment of economic, environmental and social impacts, feed-food competition and economic robustness of dairy and beef farming systems in South Western Europe. *Sustainable Production and Consumption*, *36*, 439–448. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2023.01.022/>
- Zude-Sasse, M., Fountas, S., Gemtos, T. A., & Abu-Khalaf, N. (2016). *Applications of precision agriculture in horticultural crops*. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2016/81.2.2>

# Anexo I

Tabla I. Inventario del ACV del estudio en la sección 4.1. capítulo 4 de resultados. Se presenta las 3 etapas principales y sus correspondientes subetapas, la cantidad de insumos, el costo y su ítem y sector en la base de datos. La información se presenta en inglés por ser el idioma y formato de origen de la base de datos

Life cycle phases	€/UF	Exiobase sector	Data base	Unit	Quantity
Upstream					
Inputs Production					
Implement shed, headstock	2.3E-03	Construction work (45)		p/UF	2.0E-07
Irrigation head	4.7E-03	Construction work (45)	Pump station {RoW}   construction   APOS, U	p/UF	
Drip irrigation network	5.1E-03	Construction work (45)	Polyethylene, high density, granulate {RER}   production   APOS, U	p/UF	2.0E-07
PE waterproofed regulating reservoir	2.1E-03	Construction work (45)	Water storage {RoW}   construction   APOS, U	p/UF	2.0E-07
Crop infrastructure	1.4E-02				
Phytosanitary	1.3E-02	Chemicals nec	Pesticide, unspecified {RoW}   production   APOS, U / Packaging, for liquid fertilisers or pesticides per kilogram of packed product   APOS, U /	kg/UF	4.8E-04
Fertilizer	1.4E-02	N-fertiliser	Phosphoric acid, fertiliser grade, without water, in 70% solution state {RoW}   phosphoric acid production, dihydrate process   APOS, U / Ammonium nitrate, as N {RER}   ammonium nitrate production   APOS, U / Calcium nitrate {RER}   production   APOS, U / Potassium nitrate {RER}   production   APOS, U	kg/UF	5.1E-02
Herbicide	1.7E-03	Chemicals nec	Pesticide, unspecified {RoW}   production   APOS, U / Packaging, for fertilisers or pesticides {GLO}   packaging production for solid fertiliser or pesticide, per kilogram of packed product   APOS, U	kg/UF	1.9E-04
Input packaging materials	1.4E-02				
Bins HDPE	1.9E-05	Plastics, basic	Polystyrene, high impact {RER}   production   APOS, U	kg/UF	6.9E-05
Wooden pallets	1.0E-03	Wood and products of wood and cork (except furniture); articles of straw and plaiting materials (20)	Wood pellet, measured as dry mass {RoW}   wood pellet production   APOS, U	kg/UF	5.7E-02
Cardboard box	9.9E-03	Paper and paper products	Corrugated board box {RoW}   production   APOS, U	kg/UF	4.1E-02
Kraft paper	2.8E-03	Paper and paper products	Kraft paper, bleached {RoW}   production   APOS, U	kg/UF	1.2E-02
Film	3.1E-04	Plastics, basic	Packaging film, low density polyethylene {RoW}   production   APOS, U	kg/UF	1.1E-03
Auxiliar material	5.3E-04	Fabricated metal products, except machinery and equipment (28)	-	-	-
Transport	3.0E-03		transport, freight, lorry 32 t, and EURO5	t km	3.0E-02
Crop establishment					

Preparation and planting	8.1E-03	Crops nec	Planting {RoW}   processing   APOS, U / Tillage, rotary cultivator {RoW}   processing   APOS, U / Mowing, by motor mower {RoW}   processing   APOS, U /	ha	1.9E-06
Irrigation	3.2E-02	Collected and purified water, distribution services of water (41)	irrigation {ES}   irrigation, drip   APOS, U	m3/UF	8.6E-03
Transport	2.4E-05		transport, freight, lorry 32 t, and EURO5	tkm	2.5E-04
Core					
Crop production					
Irrigation	-		irrigation {ES}   irrigation, drip   APOS, U	m3/UF	1.3E-01
Annual pruning	2.2E-02	Products of forestry, logging and related services (02)	Tractor, 4-wheel, agricultural {RoW}     APOS, U / Agricultural trailer {RoW}     APOS, U	ha	2.9E-05
Green pruning	1.4E-02	Products of forestry, logging and related services (02)	Tractor, 4-wheel, agricultural {RoW}     APOS, U / Agricultural trailer {RoW}     APOS, U	ha	2.9E-05
Crop insurance	7.1E-02	Public administration and defence services; compulsory social security services (75)			
Crop management	2.5E-01		Tractor, 4-wheel, agricultural {RoW}     APOS, U / Agricultural trailer {RoW}     APOS, U / Application of plant protection product, by field sprayer {RoW}   processing   APOS, U	ha	8.6E-05
Machinery	1.6E-02	Renting services of machinery and equipment without operator and of personal and household goods (71)	Tillage, currying, by weeder {RoW}   processing   APOS, U	ha	2.9E-05
Maintenance	3.0E-03	Sale, maintenance, repair of motor vehicles, motor vehicles parts, motorcycles, motor cycles parts and accessories	Agriculture machinery maintenance {ReR}   APOS, U	p	2.9E-05
Electric energy	3.6E-03	Electricity mix	Electricity, medium voltage {ES}   market for   APOS, U / Electricity, medium voltage {ES}   electricity voltage transformation from high to medium voltage   APOS, U / Electricity, high voltage {ES}   production mix   APOS, U	kWh	3.6E-02
Thinning	6.8E-02	Products of forestry, logging and related services (02)	Tractor, 4-wheel, agricultural {RoW}     APOS, U / Agricultural trailer {RoW}     APOS, U	ha	2.9E-05
Collection	1.5E-01	Products of forestry, logging and related services (02)	Tractor, 4-wheel, agricultural {RoW}     APOS, U / Agricultural trailer {RoW}     APOS, U	ha	2.9E-05
Personal	4.5E-02	Other services			
Transport	1.4E-04		transport, freight, lorry 32 t, and EURO5	tkm	1.5E-03
Preparation, Selection and Packaging					
Water	7.4E-04	Collected and purified water, distribution services of water (41)	Tap water {Europe without Switzerland}   tap water production, conventional treatment   APOS, U	m3/UF	1.3E-04
Waste water treatment	-	Food waste for treatment: waste water treatment			
Workers	9.5E-02	Other services			

Electric energy	7.0E-04	Electric mix	Electricity, medium voltage {ES}   market for   APOS, U /Electricity, medium voltage {ES}   electricity voltage transformation from high to medium voltage   APOS, U/ Electricity, high voltage {ES}   production mix   APOS, U	kWh	9.2E-03
Storage	1.3E-03	Electric mix	Electricity, medium voltage {ES}   market for   APOS, U /Electricity, medium voltage {ES}   electricity voltage transformation from high to medium voltage   APOS, U/ Electricity, high voltage {ES}   production mix   APOS, U	kWh	1.3E-02
Downstream Distribution	4.6E-02				
Transport	4.1E-02	Other land transportation services	freight, lorry with refrigeration machine, 20 t, EURO3, liquid refrigerant.	tkm	3.7E-01
Transport	5.5E-03	Other land transportation services	cooled 7 t lorry EURO 3	tkm	5.0E-02
Use					
Electric energy	9.0E-03	Electricity mix	Electricity, medium voltage {ES}   market for   APOS, U /Electricity, medium voltage {ES}   electricity voltage transformation from high to medium voltage   APOS, U/ Electricity, high voltage {ES}   production mix   APOS, U	kWh	7.5E-02
Water use	2.1E-04	Collected and purified water, distribution services of water (41)	Tap water {Europe without Switzerland}   tap water production, conventional treatment   APOS, U	m3/UF	2.0E-04
Water waste treatment	1.7E-04	Other waste for treatment: waste water treatment			
End of life Food waste					
Transport	5.0E-04	Other land transportation services	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   APOS, U	tkm	5.1E-03
Compost	4.1E-03	Food waste for treatment: composting and land application			
Energy recovery	9.6E-04	Food waste for treatment: incineration			
Landfill	6.2E-03	Food waste for treatment: landfill			
End of life Packaging waste					
Transport	2.9E-04	Other land transportation services	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   APOS, U	tkm	3.0E-03
Energy recovery	1.1E-02	Plastic waste for treatment: incineration			
Landfill	3.4E-02	Plastic waste for treatment: landfill			

## Anexo II

Tabla II. Inventario de materiales y procesos del ACV del estudio en la sección 4.3. del capítulo 4 de resultados

Información del Cultivo	Variedad	Producción anual (kg)	Años de producción del cultivo	Sistema de Conducción	Marco de plantación	Plantas / ha	ha cultivo	
NECTARINA	TODAS	35,000	18	Vaso	5x3	667	405	
Manejo de cultivo								
Preparación de suelos - Establecimiento del cultivo	Proceso	Propulsión	Equipo	Horas maquina (MA) h/ha	€/h	mano de obra (MO) h/ha	€/h	Diesel L/h
	Transformación de parcela	Tractor	Desfondador, vertederas, gradas, traillas	18	35	18	10,32	11
	Quitar raíces y piedras manual	Tractor	Plataforma capazos, azadas...	4	30	65	9,77	9
	Pre-plantación	Tractor	Cultivador, fresadora	18	30	18	10,32	9
				40				29
Preparación de suelos - Manejo anual del cultivo	Proceso	Propulsión	Equipo	Horas MA (h/ha · año)	€/h	horas MO	€/h	Diesel (l)
	Suelo sin laboreo							
	Herbicida	Tractor	cuba con barras de herbicida	6	30	6	10,32	8
	Triturado de ramas	Tractor	trituratora	10	30	10	10,32	9,5
				16		16		17,5
Instalación sistema de conducción	Proceso							
	Sin sistema de conducción							
Manejos del cultivo - Establecimiento del cultivo	Proceso	Equipo	Herramientas	Material	MO (h/ha)	€/h	A (h/ha)	Fecha
	Plantación	Tractor con asurcado	Azada, tijeras, etc.,	Plantones Protector-es	95	9,77	20	Enero-febrero
	Podas de Formación		Tijeras, serrucho	Cañas	88	10,57	diésel l	Primavera-verano-otoño
							14,5	
Manejos del cultivo - Producción Anual del cultivo	Proceso	Equipo	Herramientas	Material	MO (h/ha)	MO €/hp	Fecha	diésel L/h
	Recolección	Tractor + plataforma	Capazos, banquetas	cajas de fruta	520	8,31	Mayo-sept	30
	Aclareo		Banquetas		450	8,31	Feb-Marzo	
	Poda invierno		Herramientas de poda		160	10,57	Oct-Ene	
	Poda de verano		Herramientas de poda		60	10,57	Jun-Agosto	
	Otras labores		Herramientas varias		50	8,31	Todo el año	
Residuos	material vegetal por poda, envases materiales, etc.,				1240			

Nutrición	Proceso	Equipo	Fertilizante	Dosis por ha	Fecha	Diesel (l)	€/hMO y MAQ (h/ha · año)	
Fertilización - Establecimiento del cultivo	Fertirriego	Cabezal de riego (Bombas, bombas inyectoras, sistema de filtrado, tanques de abonado, programador, tuberías,..)	Ver pestaña fertilizantes	Ver pestaña fertilizantes	Febr a Nov		15	
				520	8,31	4321,2		
				450	8,31	3739,5		
Fertilización - Producción Anual del cultivo				160	10,57	1691,2		
				60	10,57	634,2		
				50	8,31	415,5		
						10801,6	0,3086	
Residuos	Envases de fertilizantes,							
Irrigación	Proceso	Equipos	Material (sector de 5 ha)	h de MO	/ h	kWh	€/ kWh	
Instalación sistema de riego	Instalación tuberías y llaves	1 línea de riego (PE, 16 mm) por fila de árbol (2000 m/ha), 3 emisores auto compensantes de 4L/h por árbol (2000 emisores/ha), Tuberías terciarias, electroválvulas, sistema de filtrado,.,	10000 m de manguera de PE de 16 mm, 10000 goteros auto compensantes, 1000 m tubería de PE 150 mm, 1 electro válvula	0	12			
	Proceso	Equipo	m <sup>3</sup> /ha · año	€/m <sup>3</sup>	Procedencia del agua	Calidad del agua	Estructura de acumulación de agua	
Establecimiento del cultivo	Riego por goteo,	Cabezal de riego	4500	0,35	Canal	CE=1,3 dS/m, pH =8	De media tenemos un embalse de entorno a 50000 m <sup>3</sup> por cada 100 ha de cultivo	
Materiales para mantenimiento anual	Por ha y año: 40 goteros, 25 uniones de 16 mm							
Residuos	Por ha y año: 40 goteros rotos							
AGROQUIMICOS	Proceso		Producto	Dosis por ha				
Producción Anual del cultivo	Control de plagas		Fungicidas	kg				
			MANCOZEB 75% WG	14,875				
			TETRACONAZO L 12,5%	0,375				
			METIL TIOFANATO 70%	0,75				
			TRIFLOXITROBI N 50% WG	0,375				

			TEBUCONAZOL 50% +	0,45				
			TRIFLOXISTRO BIN 25% WG	0,45				
			TETRACONAZO L 12,5%	0,3				
			AZUFRE 72% SC	3,75				
			FLUTRIAFOL 12,5% SC	0,3125				
			FLUOPYRAM 50%	1,625				
			DIFENOCONAZ OL 25%	0,45				
			Insecticida					
			SULFOXAFLO 12% [SC] P/V	0,5				
			TAU FLUVALINATO 24%	0,625				
			PIRIPROXIFEN 10%	0,75				
			ACRINATRIN 7,5%	1,25				
			SPINOSAD 48%	0,6875				
			FLONICAMIDA 50% WG	0,21				
			Acaricidas					
			ABAMECTINA 1,8%	1,25				

## Anexo III

Tabla III. Inventario del ACV de cantidad de producción, uso de fertilizantes, cantidad de riego y fitosanitarios entre los años 2013-2022. Correspondiente al estudio de la sección 4.4. de capítulo 4 de resultados

Finca	a	b	c	d	e	
Superficie (ha)	4,63	6,45	3,17	3,31	1,34	
Semana inicio recolección	19	22	22	18	20	
Marco plantación	5X3,5	5X3,5	5X3	5X3,5	5,5X3	
Año plantación	2012	2008	2013	2013	2013	
Producción (kg/ha)	2013	0	20,027	0	0	
	2014	17,589	28,525	6,961	0	0
	2015	40,821	40,191	36,182	8,734	31,924
	2016	41,046	39,314	45,854	27,805	33,028
	2017	33,647	38,475	26,274	30,941	37,476
	2018	35,812	35,684	33,456	27,881	35,609
	2019	37,132	37,705	32,362	32,713	34,604
	2020	36,632	34,912	34,973	22,098	30,112
	2021	38,993	34,700	40,000	31,273	31,714
	2022	34,465	34,907	36,968	27,687	30,228
Riego anual (m <sup>3</sup> /ha)	2013	5,687	6,778	0	0	1,981
	2014	7,276	7,098	6,410	1,611	6,371
	2015	6,931	8,112	8,507	2,471	7,040
	2016	5,852	7,426	9,283	5,365	7,737
	2017	4,998	5,891	6,630	4,392	6,629
	2018	5,288	4,675	5,249	4,816	5,349
	2019	5,701	5,528	4,470	4,349	6,381
	2020	3,738	4,841	3,945	3,984	5,321
	2021	3,101	4,393	3,814	2,945	5,359
	2022	4,126	4,555	4,832	4,170	4,996
Fitosanitarios (kg ingrediente activo /ha)	2013	0,000	27,430	0,000	9,350	2,397
	2014	78,632	35,931	52,225	4,609	1,982
	2015	37,756	31,834	55,561	34,931	26,319
	2016	38,487	26,128	37,570	22,968	25,177
	2017	72,324	32,983	45,286	37,426	22,536
	2018	18,249	12,327	39,372	31,769	2,889
	2019	34,870	21,618	38,402	25,253	49,064
	2020	30,562	20,317	40,416	21006	38,519

Finca	a	b	c	d	e	
Superficie (ha)	4,63	6,45	3,17	3,31	1,34	
Semana inicio recolección	19	22	22	18	20	
Marco plantación	5X3,5	5X3,5	5X3	5X3,5	5,5X3	
Año plantación	2012	2008	2013	2013	2013	
2021	38,770	10,658	39,929	6,222	37,736	
2022	14,382	22,449	20,301	1,883	6,221	
Fertilizantes (Unidades fertilizantes /ha)	2013	0	448,28	0,00	303,20	193,45
	2014	505,62	516,01	662,53	266,85	597,96
	2015	589,03	637,40	692,85	325,80	743,36
	2016	390,31	742,57	654,32	431,15	599,58
	2017	395,72	452,28	403,26	376,21	460,73
	2018	308,32	384,37	343,12	372,64	447,04
	2019	318,53	544,85	305,39	352,06	401,21
	2020	305,77	410,27	222,97	509,54	405,17
	2021	309,67	288,96	376,01	221,00	318,77
	2022	343,97	277,85	299,89	238,69	345,50

