



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

TESIS DOCTORAL



**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA, ECONOMÍA
CIRCULAR, SOSTENIBILIDAD Y EFICIENCIA
ENERGÉTICA EN UN PROYECTO DE
VALORIZACIÓN DE RESIDUOS DE LA
PRODUCCIÓN DE ACEITE DE OLIVA**

**PRESENTADA POR:
LÁZULI FERNÁNDEZ LOBATO**

**DIRIGIDA POR:
Dr. D. Francisco Jurado Melguizo
Dr. D. David Vera Candeas**

JAÉN, OCTUBRE DE 2022

ISBN



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

DOCTORAL THESIS



**LIFE CYCLE ASSESSMENT, CIRCULAR
ECONOMY, SUSTAINABILITY AND ENERGY
EFFICIENCY IN A PROJECT FOR THE
VALORIZATION OF RESIDUES FROM OLIVE
OIL PRODUCTION**

**PRESENTED BY:
LÁZULI FERNÁNDEZ LOBATO**

**DIRECTED BY:
Dr. Francisco Jurado Melguizo
Dr. David Vera Candeas**

JAÉN, OCTOBER 2022

ISBN

«La energía es esencial para el desarrollo, y la energía sostenible es esencial para el desarrollo sostenible»

(Tim Wirth, expresidente de la Fundación de Naciones Unidas)

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a mis directores, los doctores Francisco Jurado Melguizo y David Vera Candeas, puesto que gracias a su conocimiento, apoyo y dedicación ha sido posible la redacción de esta tesis y los artículos que forman parte de ella.

También a mis padres, por su apoyo incondicional y su confianza en mí. Asimismo, agradezco a mi esposa, la doctora Yaiza María López Sánchez, por ser mi guía en la carrera científica y, sobretodo, la persona que ha estado a mi lado en todo momento elevando mi ánimo y gusto por la carrera científica. Y a Zoe y Olivia, que me hacen soñar con un futuro mejor.

Por último, agradezco por su acompañamiento y virtudes al resto de autores de los artículos expuestos y a aquellas personas que han contribuido de diferentes formas a que esta tesis tenga la forma que finalmente presenta, y que han contribuido a moldear el investigador que soy una vez recorrido el camino del doctorando.

RESUMEN

El consumo de recursos y la relación con el entorno representan funciones vitales para el desempeño de la vida en términos biológicos y, desde la Revolución Industrial, se han convertido en un motor esencial que impulsa el crecimiento de las sociedades desarrolladas. Desde entonces, se ha alcanzado tal grado de explotación de recursos y generación de residuos que resulta imposible prolongarlo de forma que sea compatible con la vida tal y como la conocemos. Por ello, hemos adquirido la necesidad de equilibrar el impacto medioambiental que representan las actividades humanas para poder sobrevivir a nuestro propio desarrollo.

Tanto el consumo como la producción de aceite de oliva se están extendiendo rápidamente por numerosas regiones de nuestro planeta, siendo España el primer productor de este bien a nivel mundial. Por tanto, aprovechando la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), en esta investigación, se ha cuantificado el conjunto de impactos ambientales que se generan en distintos escenarios productivos representativos. Además, se ha evaluado, mediante la misma metodología, el desempeño ambiental de un proyecto de ingeniería eléctrica basado en la gasificación de la biomasa contenida en el alpeorujo, el residuo más problemático de los generados en la cadena de valor más representativa del aceite de oliva.

La posibilidad de gasificar la biomasa del alpeorujo en la propia almazara donde se genera evita otras actividades contaminantes que implican transportes de residuos y subproductos a plantas especializadas, como son las orujeras y las plantas de tratamiento de biomasa. Además, se genera una economía circular más potente en base a la valorización de los subproductos generados y se mejora la eficiencia energética de los procesos implicados.

En esta investigación se demuestra que la instalación de una planta de biomasa en una almazara puede generar una reducción del 8,25% del impacto ambiental normalizado en la cadena productiva del aceite de oliva. En términos de cambio climático, una de las categorías de impacto ambiental más relevantes, la instalación de la planta de gasificación propuesta en las almazaras más representativas de España disminuiría su impacto ambiental en un 21% (0,47 kg de CO₂ equivalente por kg de aceite de oliva extraído), el equivalente a las emisiones anuales de CO₂ de 220.000 vehículos.

SUMMARY

The consumption of resources and the relationship with the environment represent vital functions for the performance of life in biological terms and, since the Industrial Revolution, it has become an essential engine that drives the growth of developed societies. Since then, such a degree of exploitation of resources and generation of waste has been reached that it is impossible to prolong it in a way compatible with life as we know it. Therefore, we have acquired the need to balance the environmental impact of human activities in order to survive our own development.

Both the consumption and production of olive oil are spreading rapidly throughout many regions of our planet, with Spain being the leading producer of this good worldwide. Therefore, taking advantage of the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, in this research, the set of environmental impacts generated in different representative production scenarios have been quantified. In addition, the environmental performance of an electrical engineering project based on the gasification of the biomass contained in the alpeorujo, the most problematic waste generated in the most representative value chain of olive oil, has been evaluated using the same methodology.

The possibility of gasifying the biomass of the *“alpeorujo”* in the olive oil mill where it is generated avoids other polluting activities that involve transporting waste and by-products to specialized plants, such as olive pomace mills and biomass treatment plants. In addition, a more powerful circular economy is generated based on the recovery of the by-products generated and the energy efficiency of the processes involved is improved.

This research shows that the installation of a biomass plant in an oil mill can generate a reduction of 8.25% of the normalized environmental impact in the olive oil production chain. In terms of climate change, one of the most relevant environmental impact categories, the installation of the proposed gasification plant in the most representative olive oil mills in Spain would reduce their environmental impact by 21% (0.47 kg of CO₂ equivalent per kg of extracted olive oil), the equivalent of the annual CO₂ emissions of 220,000 vehicles.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pg.
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. MARCO CONTEXTUAL	17
1.1.1. <i>PRODUCCIÓN DE ACEITE DE OLIVA EN ESPAÑA</i>	20
1.1.2. <i>PRODUCCIÓN DE ACEITE DE OLIVA EN TÚNEZ</i>	24
1.2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	27
1.2.1. <i>HIPÓTESIS</i>	27
1.2.2. <i>OBJETIVO GENERAL</i>	27
1.2.3. <i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	28
1.2.4. <i>RESULTADOS ESPERADOS</i>	28
1.3. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO GENERAL	29
1.3.1. <i>REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE</i>	29
1.3.2. <i>ESTUDIO EMPÍRICO</i>	32
1.4. ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN	37
1.5. BIBLIOGRAFÍA	38
CAPÍTULO 2. LIFE CYCLE ASSESSMENT OF THE SPANISH VIRGIN OLIVE OIL PRODUCTION: A CASE STUDY FOR ANDALUSIAN REGION	45
2.1. INTRODUCTION	48
2.1.1. <i>CASE STUDY: JAEN AS A LEADING TERRITORY FOR OLIVE OIL PRODUCTION IN SPAIN</i>	51
2.2. METHODOLOGY	52
2.2.1. <i>FUNCTIONAL UNIT AND SYSTEM BOUNDARIES</i>	53
2.2.2. <i>LIFE CYCLE INVENTORY</i>	55
2.2.3. <i>LIFE CYCLE ASSESSMENT APPLIED TO OLIVE OIL PRODUCTION</i>	64
2.2.4. <i>CARBON SEQUESTRATION IN OLIVE OIL PRODUCTION</i>	65
2.3. RESULTS AND DISCUSSION	66
2.4. CONCLUSION	74
2.5. ACKNOWLEDGMENTS	75
2.6. REFERENCES	75
CAPÍTULO 3. LIFE CYCLE ASSESSMENT, C FOOTPRINT AND CARBON BALANCE OF VIRGIN OLIVE OILS PRODUCTION FROM TRADITIONAL AND INTENSIVE OLIVE GROVES IN SOUTHERN SPAIN	83
3.1. INTRODUCTION	86
3.2. METHODOLOGY	89
3.2.1. <i>STUDY CASES</i>	89
3.2.2. <i>GOAL AND SCOPE DEFINITION</i>	90
3.2.3. <i>LIFE CYCLE INVENTORY</i>	94
3.2.4. <i>LIFE CYCLE ASSESSMENT APPLIED TO VOO PRODUCTION</i>	95
3.2.5. <i>CARBON FOOTPRINT IN THE FARMING PHASE</i>	96
3.2.6. <i>CARBON BALANCES IN THE FARMING PHASE</i>	98
3.3. RESULTS AND DISCUSSION	98
3.3.1. <i>ENVIRONMENTAL IMPACTS OF EXTRA VOOS PRODUCTION</i>	98
3.3.2. <i>C FOOTPRINT</i>	105

3.3.3. C BALANCE	110
3.4. CONCLUSION	112
3.5. ACKNOWLEDGMENTS	113
3.6. REFERENCES	113
CAPÍTULO 4. LIFE CYCLE ASSESSMENT OF THE MOST REPRESENTATIVE VIRGIN OLIVE OIL PRODUCTION SYSTEMS IN TUNISIA	123
4.1. INTRODUCTION	126
4.2. LITERATURE REVIEW	129
4.3. METHODS	130
4.3.1. GOAL AND SCOPE DEFINITION	131
4.3.2. LIFE CYCLE INVENTORY	138
4.3.3. ECONOMIC ALLOCATION TO MAIN PRODUCT AND BY-PRODUCTS	147
4.4. RESULTS AND DISCUSSION	148
4.5. CONCLUSIONS	159
4.6. REFERENCES	161
CAPÍTULO 5. BIOMASS GASIFICATION AS A KEY TECHNOLOGY TO REDUCE THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF VIRGIN OLIVE OIL PRODUCTION: A LIFE CYCLE ASSESSMENT APPROACH	169
5.1. INTRODUCTION	172
5.2. METHODOLOGY	176
5.2.1. CASE STUDY	176
5.2.2. GOAL AND SCOPE DEFINITION	183
5.2.3. LIFE CYCLE INVENTORY	188
5.2.4. LCA APPLIED TO VIRGIN OLIVE OILS PRODUCTION	193
5.3. RESULTS AND DISCUSSION	194
5.3.1. ENVIRONMENTAL IMPACTS OF SCENARIO A	194
5.3.2. ENVIRONMENTAL IMPACTS OF SCENARIO B	196
5.3.3. IMPROVEMENT OF THE ENVIRONMENTAL PERFORMANCE	197
5.4. CONCLUSIONS	201
5.5. REFERENCES	203
5.6. APPENDICES	212
CAPÍTULO 6. MAIN RESULTS AND INTEGRATED DISCUSSION, CONCLUSIONS AND FUTURE WORK	215
6.1. MAIN RESULTS AND INTEGRATED DISCUSSION	217
6.2. CONCLUSIONS	219
6.3. FUTURE WORK	220
ANEXOS	223
ANEXO A1. RESULTADOS GENERALES DE IMPACTO AMBIENTAL POR SISTEMA	225
ANEXO A2. RESULTADOS GENERALES DE IMPACTO AMBIENTAL POR ESCENARIO	226
CURRICULUM VITAE	227

ÍNDICE DE TABLAS

	Pg.
CAPÍTULO 1	
Tabla 1.1. Clasificación de los tipos de aceite de oliva.....	18
CAPÍTULO 2	
Table 2.1. Olive grove surface and production of olive oil in Andalusia (Ministry of Agriculture Fisheries and Food, 2020).	52
Table 2.2. Cases studied: harvests 15/16 to 19/20 in the province of Jaen (Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, 2019, 2018, 2017, 2016, 2015), (IDAE, 2019), (Spanish meteorological agency, 2020) and (Olimerca, 2020).....	57
Table 2.3. Life cycle inventory of olives production in Jaen.....	60
Table 2.4. Life cycle inventory of VOOs production in Jaen.	63
Table 2.5. Carbon sequestration parameters.	65
Table 2.6. Comparative analysis of the LCA (per FU) for five harvests (15/16 to 19/20) in Jaen.....	67
Table 2.7. Values of long-term carbon sequestration for returned organic material to soil.	70
Table 2.8. Comparison of results with different authors and EPDs (EPD Sellas, 2013, EPD Borges, 2015, Pattara et al., 2016 and Proietti et al., 2017).	72
CAPÍTULO 3	
Table 3.1. Main characteristics of the surveyed olive groves for the farming phase and OOM for the industrial phase in the province of Jaen.....	93
Table 3.2. EI of the farming phase and the industrial phase per FU. Values of the farming phase are the mean \pm standard deviation of 4 or 3 olive farms. A different letter stands for significant differences (one-way ANOVA, $\alpha = 0.05$ for lower case, $\alpha = 0.1$ for cap	101
Table 3.3. Impact on climate change of producing different olive oil FU at the farm and industrial phases published by other authors (EPD Sellas, 2013, EPD Borges, 2015, Pattara et al., 2016, Proietti et al., 2017 and Romero-Gámez et al., 2017).....	104
Table 3.4. On and off-farm C and CO ₂ eq. in and out fluxes considered in calculating the C footprint and C balances in traditional rainfed, traditional irrigated and intensive olive groves. Values are the mean \pm standard deviation of 4 or 3 olive farms. A different letter stands for significant (one-way ANOVA, $\alpha = 0.05$) differences among olive farm models.	106

CAPÍTULO 4

Table 4.1. Representativeness of the main typologies of olive grove considered in this study by its location.....	136
Table 4.2. Representativeness of the main typologies of the industrial phase by the number of OOM, their theoretical milling capacity, and estimated actual daily volumes (DGPA, 2020).	137
Table 4.3. Sample size of the types analyzed for the farming and industrial phases in Tunisia.....	137
Table 4.4. Farming phase LCI summary in Tunisia (inventory data per ha) (*C.V: coefficient of variation).	145
Table 4.5. Industrial phase LCI summary in Tunisia (inventory data per 1 ton of VOO) (*C.V: coefficient of variation).....	146
Table 4.6. LCA-Farming stage (by type and subtype of agricultural system in Tunisia).	150
Table 4.7. LCA-Industrial stage (by type and subtype of industrial system in Tunisia).	152
Table 4.8. Economic allocation of different by-products (Traditional cultivation and 3-phase extraction).....	154
Table 4.9. Representative data and results comparison between the present work and other related studies.	156
Table 4.10. Comparative analysis of the main results of farming phase EI.....	158

CAPÍTULO 5

Table 5.1. Scope of the present work in the context of other related works in the olive oil sector.....	176
Table 5.2. Physicochemical properties of olive pomace (two-phase extraction process).	178
Table 5.3. Features of the integrated gasification plant.	183
Table 5.4. Main characteristics of the surveyed olive groves for the farming phase and oil mill for the industrial phase in Andalusia.	187
Table 5.5. Impact of biochar returned to the soil on the LCI of Scenario B (units per hectare).	193
Table 5.6. EIs for different impact categories in Scenario A "Traditional".	195
Table 5.7. EIs for different impact categories in Scenario B "Gasification".	196

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pg.
CAPÍTULO 1	
Fig. 1.1. Categorías y tipos de aceites de oliva en el mercado de la Unión Europea (Diario Oficial de la Unión Europea, 2013).	19
Fig. 1.2. Distribución del olivar en Andalucía (España) (“Visor SigPac V 4.8,” n.d.).	20
Fig. 1.3. Sistema de producción de aceite de oliva en 2 fases (Vera et al., 2019).....	22
Fig. 1.4. Alcance del análisis de ciclo de vida en el estudio (Fernández-Lobato et al., 2021b).	34
Fig. 1.5. Alcance del análisis de ciclo de vida, considerando la conversión energética del orujillo tradicional vs la gasificación en almazara (Fernández-Lobato et al., 2022).	35
 CAPÍTULO 2	
Fig. 2.1. Worldwide market rate of the top olive oil producers from the harvest 15/16 to 19/20 (International Olive Oil Council, 2019).	51
Fig. 2.2. Phases of the virgin olive oil life cycle from cradle to gate.	54
Fig. 2.3. 2-phase olive oil production system in Spain (Vera et al., 2019).....	62
Fig. 2.4. Distribution of the impact by phases in different categories for the weighted average.....	67
Fig. 2.5. Phase impact in Climate change category (kg CO ₂ eq.).	68
Fig. 2.6. Distribution of the impact of the farming phase in different categories for the weighted average.	69
Fig. 2.7. Distribution of the impact of the industrial phase in different categories for the weighted average.	70
Fig. 2.8. CO ₂ equivalent balance for climate change category based in the long-term carbon sequestration hypothesis for different harvests and weighted average.....	71
 CAPÍTULO 3	
Fig. 3.1. Upstream and core processes of the production of VOOs considered in this study.	91
Fig. 3.2. Distribution of EI of the industrial phase in different categories for the weighted average.....	102
Fig. 3.3. Distribution of EI in climate change category. Data are the mean of 3 or 4 olive farms. Different letters stand for significant differences among olive grove systems (one-way ANOVA, $\alpha = 0.10$).	103
Fig. 3.4. C footprint (kg CO ₂ ha ⁻¹) per hectare and year in the farming phase (a) and in the farm and industrial phases (kg CO ₂ kg ⁻¹ olive oil) (b) in traditional rainfed, traditional irrigated and intensive olive groves. Data are the mean of 3 or 4 olive farms.	107

Fig. 3.5. Relationship between fresh olive fruit yield and C footprint (kg CO₂ ha⁻¹) in the 11 study cases..... 108

Fig. 3.6. C footprint (kg CO₂ eq. ha⁻¹ y⁻¹) per hectare and year in the farming phase, assuming no soil CO₂ emission, soil CO₂ emission, CO₂ emission from the non-permanent tree structures or CO₂ emission of the tree permanent structures in traditional rainfed, traditional irrigated and intensive olive groves. Data are the mean of 3 or 4 olive farms. Different letters stand for significant differences among olive groves systems (one-way ANOVA, $\alpha = 0.05$)..... 109

Fig. 3.7. C balances on farms factoring in the CO₂ eq. emitted during farming operations (kg C ha⁻¹ y⁻¹) in traditional rainfed, traditional irrigated and intensive olive groves. Data are the mean of 3 or 4 olive farms. Different letters stand for significant differences among olive grove systems (one-way ANOVA, $\alpha = 0.05$). 111

CAPÍTULO 4

Fig. 4.1. Evolution of olive oil production in Tunisia from 2010-2011 to 2019-2020 (IOC, 2021). 128

Fig. 4.2. System boundaries for life cycle assessment (LCA) (Maffia et al., 2020). 132

Fig. 4.3. Main virgin olive oil extraction processes in Tunisia. 133

Fig. 4.4. Contribution of farming stage activities (extensive rainfed)..... 151

Fig. 4.5. Contribution of industrial stage activities (3-phase extraction). 153

Fig. 4.6. Contribution to the environmental impact of the farming and industrial phases (VOO production, Tunisia).. 155

Fig. 4.7. Total environmental impact of Spain and Tunisia for VOO production (all impact categories)..... 157

CAPÍTULO 5

Fig. 5.1. Process flow diagram of the integrated gasification plant for on-site olive pomace management..... 181

Fig. 5.2. Scope of the scenarios considered for the present work (in brackets, the mass distribution of products in relation to the input mass of olives)..... 186

Fig. 5.3. Radar chart of the environmental performances of Scenario A and Scenario B. The EIs of each impact category are represented in decimal logarithmic scales. 198

Fig. 5.4. Improvement of environmental performance. 199

Fig. 5.5. Normalized EIs of each impact category in Scenario A and Scenario B. 200

CAPÍTULO 6

Fig. 6.1. Environmental impact on climate change in Spain (capítulo 3)..... 217

Fig. 6.2. Environmental impact on climate change in Tunisia (capítulo 4). 218

Fig. 6.3. Environmental impact on climate change by scenarios (capítulos 2,4 and 5). 218

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. MARCO CONTEXTUAL

La Comisión Europea (CE) define el Aceite de Oliva Virgen como “aceite obtenido del fruto del olivo únicamente por medios mecánicos u otros medios físicos en condiciones que no produzcan alteración en el aceite. Esta forma de extracción no ha sufrido ningún otro tratamiento que no sea el lavado, decantación, centrifugación o filtración, con exclusión de los aceites obtenidos mediante disolventes o coadyuvantes de acción química o bioquímica, o por proceso de reesterificación y cualquier mezcla con aceites de otra naturaleza” (The Council of the European Union, 2001). Clasifica como aceites de oliva vírgenes el aceite de oliva virgen extra, el aceite de oliva virgen y el aceite de oliva virgen lampante; el resto de categorías definidas son aceite de oliva, aceite de oliva compuesto por aceites de oliva refinados y vírgenes, aceite de orujo de oliva crudo, aceite de orujo de oliva refinado y aceite de orujo de oliva.

Según el Consejo Oleícola Internacional, los diez países con mayor producción de aceite de oliva representan más del 90 % de la producción mundial. España representa al mayor productor, con una tasa que supera en ocasiones el 50% de la producción mundial, seguido de otros países como Italia y Grecia, que difícilmente llegan al 10% (International Olive Oil Council, 2019a).

El Consejo Oleícola Internacional clasifica las diferentes clases de Aceite de Oliva de la como se muestra en la Tabla 1.1:

Tabla 1.1. Clasificación de los tipos de aceite de oliva.

1. Aceites de Oliva Virgen.
Aceite de oliva virgen extra: aceite de oliva virgen que tiene una acidez libre, expresada en ácido oleico, no superior a 0,8 gramos por 100 gramos, y cuyas demás características corresponden a las fijadas para esta categoría en la norma del Consejo Oleícola Internacional (COI o IOC, del inglés <i>International Olive Council</i>).
Aceite de oliva virgen: aceite de oliva virgen que tiene una acidez libre, expresada en ácido oleico, de no más de 2 gramos por 100 gramos y cuyas demás características corresponden a las fijadas para esta categoría en la norma del COI.
Aceite de oliva virgen corriente: aceite de oliva virgen que tiene una acidez libre, expresada en ácido oleico, no superior a 3,3 gramos por 100 gramos y cuyas demás características corresponden a las fijadas para esta categoría en la norma del COI. Esta designación solo puede venderse directamente al consumidor si está permitido en el país de venta minorista. Si no está permitido, la designación de este producto debe cumplir con las disposiciones legales del país en cuestión.
Aceite de oliva virgen lampante, no apto para el consumo: es el aceite de oliva virgen que tiene una acidez libre, expresada en ácido oleico, superior a 3,3 gramos por 100 gramos y/o las características organolépticas y otras características de que corresponden a los fijados para esta categoría en la norma IOC. Está destinado a la refinación o para uso técnico.
2. Aceites de Oliva no vírgenes.
Aceite de oliva refinado: es el aceite de oliva obtenido a partir de aceites de oliva vírgenes mediante métodos de refinado que no dan lugar a alteraciones en la estructura glicerídica inicial. Tiene una acidez libre, expresada en ácido oleico, de no más de 0,3 gramos por 100 gramos y sus demás características corresponden a las fijadas para esta categoría en la norma COI. Esta designación solo puede venderse directamente al consumidor si está permitido en el país de venta minorista.
Aceite de oliva es el aceite constituido por una mezcla de aceite de oliva refinado y aceites de oliva vírgenes aptos para el consumo tal cual. Tiene una acidez libre, expresada en ácido oleico, de no más de 1 gramo por 100 gramos y sus demás características corresponden a las fijadas para esta categoría en la norma IOC. El país de venta al por menor puede requerir una designación más específica.
Aceite de orujo de oliva crudo: es el aceite de orujo de oliva cuyas características corresponden a las fijadas para esta categoría en la norma del COI. Se destina a refinación para uso para consumo humano, o se destina a uso técnico.
Aceite de orujo de oliva refinado: es el aceite obtenido a partir del aceite de orujo de oliva crudo por métodos de refinado que no dan lugar a alteraciones en la estructura glicerídica inicial. Tiene una acidez libre, expresada en ácido oleico, de no más de 0,3 gramos por 100 gramos y sus demás características corresponden a las fijadas para esta categoría en la norma del COI. Este producto solo puede venderse directamente al consumidor si está permitido en el país de venta minorista.
Aceite de orujo de oliva: es el aceite constituido por la mezcla de aceite de orujo de oliva refinado y aceites de oliva vírgenes aptos para el consumo tal cual. Tiene una acidez libre de no más de 1 gramo por 100 gramos y sus demás características corresponden a las fijadas para esta categoría en la norma IOC. El país de venta al por menor puede requerir una designación más específica.

Esta denominación toma valores de las características de calidad y pureza expresadas en la Comisión Europea (Russo et al., 2016b), añadiendo el aceite de oliva virgen ordinario como una especie de aceite de oliva virgen, que tiene una acidez libre, no superior a 3,3 gramos por 100 gramos y otras características para esta categoría en el estándar del COI.

En cuanto al mercado de la UE, los aceites de oliva se clasifican en la “Clasificación estadística de actividades económicas en la Comunidad Europea” con el código NACE 10.41 (Fabricación de aceites y grasas), y con códigos CPA como se muestra en la Fig. 1.1.

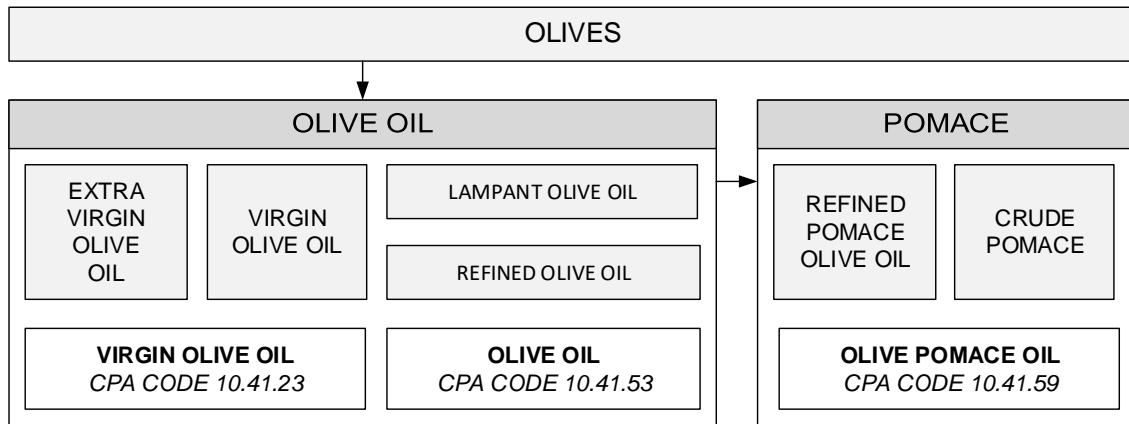


Fig. 1.1. Categorías y tipos de aceites de oliva en el mercado de la Unión Europea (Diario Oficial de la Unión Europea, 2013).

La demanda actual de los consumidores de una identificación geográfica ha dado lugar a una regulación de la Comisión Europea (2006) (European Union, 2006). Este reglamento establece un etiquetado controlado de productos alimenticios, aceite de oliva virgen entre otros, en base a indicaciones geográficas como la Denominación de Origen Protegida (DOP).

En el caso particular del aceite de oliva virgen, esta información se considera como una garantía adicional de calidad, autenticidad, tradición y seguridad (García-González and Aparicio, 2010). Como afirman García-González y Aparicio (2010), la reciente importancia económica y regulatoria de la denominación de origen protegida (DOP) y la indicación geográfica protegida (IGP) el aceite de oliva virgen ha desafiado a los investigadores a implementar metodologías que controlen el etiquetado incorrecto del origen geográfico (por ejemplo, DOP falsas), que es una de las prioridades de los productores y de las administraciones antifraude”.

En relación con el método de producción, tal y como expone la Comisión Europea (2081/92, 1992), los olivos pertenecen a fincas registradas situadas en secano o regadío. La cantidad máxima de nitrógeno aplicada cada año no podrá exceder de 1 kg por árbol. La poda ligera se realiza durante el período de formación de frutos y, en el caso de árboles adultos, se debe preservar la relación hoja/madera.

Estudios realizados por Goldhamer, et al (1994), Castro et al. (1999) y Mariscal et al. (2000) en el sector muestran que la producción aumenta considerablemente con la práctica del riego, ya que mientras las producciones habituales de los olivares tradicionales en secano oscilan entre los 2.000 y 5.000 kg/ha según zonas, la producción de olivar bien regado puede acercarse a los 15.000 kg/ha y año para aceituna de almazara.

1.1.1. PRODUCCIÓN DE ACEITE DE OLIVA EN ESPAÑA

SISTEMA DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA DE ACEITUNA DE ALMAZARA.

La superficie total de cultivo del olivo en España ronda los 2,5 millones de ha. La región andaluza tiene la mayor superficie con más de 1,6 millones de ha. El cultivo del olivo ocupa más del 30 % de la superficie agrícola de Andalucía, adquiriendo una gran importancia en toda la provincia de Jaén, sur de Córdoba, noroeste de Granada, norte de Málaga y sureste de Sevilla (Ministry of Agriculture Fisheries and Food, 2020). A continuación, en la Fig. 1.2, se muestra un mapa obtenido del Visor SIGPAC, donde se refleja la densidad de olivar en Andalucía.

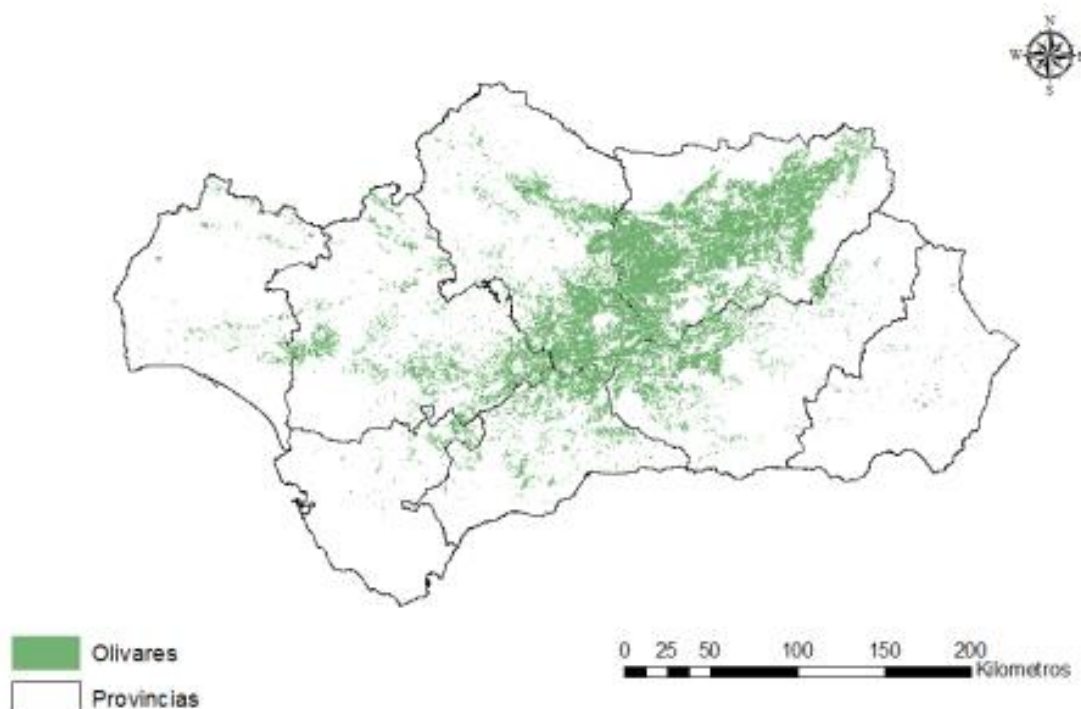


Fig. 1.2. Distribución del olivar en Andalucía (España) ("Visor SigPac V 4.8," n.d.).

La aceituna recolectada se destina principalmente a la producción de aceite de oliva (92%), mientras que el resto (aproximadamente un 8%) se destina a aceituna de mesa

(Ministry of Agriculture Fisheries and Food, 2020). La Junta de Andalucía afirma que el olivar se ha cultivado tradicionalmente en secano, es un cultivo bien adaptado a las condiciones climáticas de Andalucía, y soporta periodos de extrema sequía (Junta de Andalucía, 2015). Esta variable tiene un carácter dicotómico; las parcelas se pueden cultivar en secano o en regadío, lo que permite contabilizar la superficie de olivar andaluz bajo regadío.

Tipos de explotación

Los tipos de explotación se pueden agrupar en función de distintas variables como la producción media, la pendiente media del terreno donde se asienta el olivar o la densidad de plantación (árboles/ha) con carácter general. En respuesta a estas variables, se establecen 6 tipologías de cultivo (Junta de Andalucía, 2015):

- **Tipo 1, Olivar de bajo rendimiento:** olivares con rendimientos iguales o inferiores a 775 kg de aceituna/ha, cultivados en zonas con malas condiciones edafo-climáticas o con fuertes pendientes.
- **Tipo 2, Olivar de alta pendiente:** olivar cultivado en suelos con mejores condiciones agronómicas, con una pendiente igual o superior al 20%. Debido a la gran pendiente, no es posible recolectar la aceituna con medios mecánicos.
- **Tipo 3, Olivar extensivo con una densidad igual o inferior a 150 árboles/ha:** olivar cultivado con una pendiente inferior al 20% y una densidad de plantación igual o inferior a 150 árboles/ha, siendo posible la recolección mecanizada de la aceituna.
- **Tipo 4, Olivar extensivo de densidad media:** olivar cultivado con pendiente inferior al 20% y densidad de plantación de 150 a 180 árboles/ha, posibilitando la recolección mecanizada de la aceituna.
- **Tipo 5, Olivar Intensivo:** olivar con densidad de plantación de 180 a 325 árboles/ha, situado en zonas llanas. Recolección de aceitunas mecanizada.
- **Tipo 6, Olivar superintensivo:** olivar con una densidad de plantación superior a 325 árboles/ha, situado en zonas llanas. Recolección de aceitunas mecanizada.

Según datos de la Junta de Andalucía y del Ministerio de Agricultura, el tipo de mayor superficie corresponde a olivares extensivos con densidad igual o inferior a 150 árboles/ha, con más de 700.000 hectáreas (47%). Por su parte, el olivar de alta pendiente representa unas 350.000 hectáreas (23 %) y el olivar intensivo, más de

200.000 hectáreas (14%). El olivar de bajo rendimiento y el olivar extensivo de densidad media representan en torno al 6% y el 7 % respectivamente. Finalmente, en torno a 20.000 hectáreas corresponden a olivares de tipo superintensivo, que apenas representan el 2% de la superficie de olivar andaluz.

SISTEMA DE PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DE ACEITE DE OLIVA.

Actualmente, el número total de almazaras españolas operativas es de 1835 (tanto privadas como cooperativas), en la región andaluza se ubican 848 de las mismas. El sistema de producción de aceite de oliva virgen español se basa principalmente en el sistema de separación mecánica (centrifugación) de 2 fases. Este sistema es el descrito en la Fig. 1.3. Según el plan director del olivar andaluz (Regional Government of Andalusia, 2015), entre el 94 y el 98% de los procesos de producción de aceite de oliva tienen un sistema de 2 fases (tanto en almazaras privadas como en cooperativas). Del resto de sistemas utilizados, mayoritariamente se emplean sistemas mixtos, mientras que el 0,5% sigue utilizando sistemas de extracción tradicionales, y sólo el 0,05% utiliza sistemas de extracción de 3 fases. Esto es un claro reflejo del proceso de modernización que ha sufrido el sector, ya que en la década de los 90 el sistema de 3 fases era mayoritario.

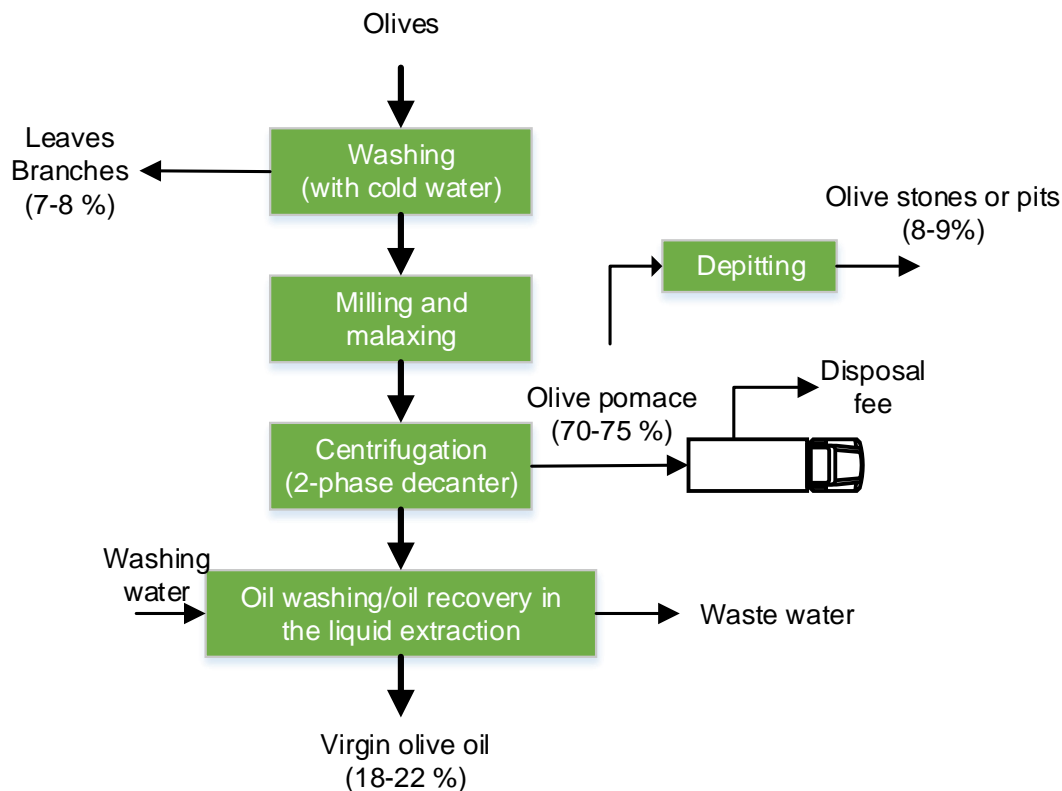


Fig. 1.3. Sistema de producción de aceite de oliva en 2 fases (Vera et al., 2019).

En el proceso de dos fases, se utiliza una centrífuga montada horizontalmente para la separación primaria de la fracción de aceite de oliva del material sólido vegetal y el agua vegetal (Cruz-Peragón et al., 2006). El aceite de oliva resultante se lava más para eliminar las impurezas residuales antes de separarlo finalmente del agua de lavado en una centrífuga vertical. Por lo tanto, las almazaras de dos fases producen tres flujos de residuos identificables y separados. Estos son:

- Las aguas de lavado generadas durante la limpieza inicial de la fruta.
- Los residuos sólidos acuosos generados durante la centrifugación primaria.
- Las aguas de lavado de la centrífuga secundaria generadas durante el lavado y depuración del aceite de oliva virgen.

Así, los efluentes finales de almazara en dos fases están formados por una parte de la primera corriente y tres partes de la tercera corriente, siendo el volumen total de efluentes generados del orden de 0,20-0,25 l/kg de aceituna procesada (García-Maraver et al., 2012).

Según la Agencia de Información y Control Alimentario, los datos de producción de aceite de oliva virgen español se sitúan en torno a las 1.200.000 toneladas de media teniendo en cuenta las campañas 2016-2021. Andalucía representa en torno al 80% de la producción del aceite de oliva virgen español (Food Information and Control Agency, 2021).

RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DEL ACEITE DE OLIVA

Como se indicaba anteriormente, la cadena de suministro del aceite de oliva en España genera cuatro tipos de residuos principales. Tres de ellos (alpeorujo, hueso y hojas) se generan durante el proceso de elaboración del aceite de oliva (caracterizado por el proceso de 2 fases en España); mientras que el otro tipo de residuos se producen en el campo como consecuencia de la poda anual o bianual de los olivos.

Según la Agencia de Información y Control Alimentario, en España coexisten actualmente 40 orujeras. Por distribución en provincias, 14 están ubicadas en la provincia de Jaén, 11 en Córdoba, 6 en Sevilla, 4 en Granada, 3 en Málaga y 1 en Almería. Atendiendo a su distribución municipal, cabe destacar que Baena y Lucena en Córdoba, Baeza y Linares en Jaén, y Dos Hermanas en Sevilla, cuentan con 2 orujeras en el mismo municipio.

Actualmente, el alpeorujo de oliva proveniente del sistema de extracción de 2 fases se transporta desde la almazara hasta las orujeras, donde se generan a su vez varios

productos: orujo de aceite de oliva virgen, orujo de aceite (refinado) y un producto residual empleado como biomasa (orujo agotado, comúnmente llamado “orujillo”). Este es un proceso de tratamiento con costes relativamente altos, en el que se utilizan combustibles fósiles como el gas natural y otros combustibles basados en biomasa, quemados en calderas de combustión o motores de gas, para el secado del alpeorujo, que contiene en torno a un 65-70% de humedad (en peso), hasta quedarse en un 10-15% de humedad (orujillo apto para su uso como biomasa). Finalmente, el orujillo se utiliza para calderas domésticas o industriales por su alto poder calorífico. Es importante destacar que el proceso de extracción de aceite de oliva en 2 fases prácticamente no produce aguas residuales de almazara (alpechín). En cuanto a la cantidad producida, los residuos de aceituna más representativos son la poda del olivo (2,5-3,0 t/ha) y el orujo de aceituna en 2 fases (700-750 kg por tonelada de aceituna procesada).

Como conclusión, se desprende que, en España, la cadena de valor más representativa de la industria del aceite de oliva en fase de cultivo es de tipo extensivo (menos de 150 olivos por hectárea), con mayor proporción de olivar de secano que de regadío. Por otro lado, el sistema de la fase industrial más representativo del aceite de oliva español se basa en la extracción de 2 fases ligado a un tratamiento de alpeorujo en las denominadas orujeras, desde donde se crean nuevos subproductos a partir del mismo.

1.1.2. PRODUCCIÓN DE ACEITE DE OLIVA EN TÚNEZ

SISTEMA DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA DE ACEITUNA DE ALMAZARA.

La producción de aceite de oliva es una actividad agrícola importante y los principales motores de la economía de una amplia gama de países mediterráneos, entre los que destaca Túnez como uno de los no pertenecientes a la UE, que mayor producción de aceite de oliva tienen. De hecho, el sector del aceite de oliva contribuye al desarrollo socioeconómico de Túnez proporcionando 40 millones de jornadas laborales al año (20% del empleo agrícola). La producción de aceituna de almazara comprende una parte importante del sector agroalimentario tunecino, representando en torno al 40% de la superficie total cosechada y el 15% de la producción agrícola. El olivar tunecino ocupa cerca de 1.850 millones de ha (la tercera parte de la superficie del país), con casi un 15% en el Norte, un 29% en el Centro, un 16% en la Costa y un 40% en el Sur y con cerca de 82 millones de olivos. La región con mayor superficie es Sfax con unas 355.000 ha.

El 95 % del cultivo del olivo es de secano, con condiciones climáticas variables. La densidad de cultivos está en 40 árboles de media por hectárea en sistemas de secano

y en los 100 a 150 árboles por hectárea en sistemas de regadío. En líneas generales, hay unos 100 olivos/ha en el norte, 60 olivos/ha en el centro y 20 olivos/ha en el sur. En el norte y en algunas zonas del centro, el olivo se cultiva en asociación con otros cultivos como cereales, frutales como los cítricos, la vid o el almendro, mientras que en el sur se cultiva exclusivamente en monocultivo.

La producción de aceitunas tunecinas fluctúa considerablemente de un año a otro, debido al fenómeno de la vecería o alternancia de cosecha de los olivos y a las condiciones climáticas extremadamente variables. La producción media anual del país oscila en torno a las 195.000 toneladas de aceite anuales. El sur aporta el 55% de la producción total de aceite de oliva, frente al 27% del centro y el 18% del norte del país (DGPA, 2020).

SISTEMA DE PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DE ACEITE DE OLIVA.

En cuanto al sector industrial, este último atraviesa una etapa de transición caracterizada por la creación y modernización de almazaras y el progresivo alejamiento de los métodos tradicionales. Actualmente, hay 1.750 almazaras de aceite de oliva en Túnez. La mayor parte de ellos está utilizando el proceso continuo de tres fases. La capacidad de trituración ha pasado de unas 8.000 t/día en 1986 a más de 40.000 t/día en los últimos años. A pesar de la modernización del sector, aún se requieren mayores esfuerzos, dado que el 35% de los sistemas son de prensado tradicional. Las almazaras se distribuyen en Túnez de la siguiente manera: 18% en el norte, 28% en la costa, 33% en la región de Sfax, 15% en el centro y suroeste y un 6% en el sureste. El sector en Túnez incluye también 15 refinerías de aceite de oliva y 14 plantas de extracción de aceite de orujo de oliva (Olive Oil Council, 2020)

RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DEL ACEITE DE OLIVA

El aumento de la producción y la introducción de técnicas modernas para la extracción de aceite (procesos continuos) durante la última década han dado como resultado el rápido aumento de la cantidad de aguas residuales producidas por la molturación de la aceituna.

El volumen actual de aguas residuales (alpechín principalmente) generadas en la producción de aceite de oliva en Túnez se estima en más de 800.000 m³ por año y puede llegar a 1.300.000 m³ por año en caso de producción alta. De hecho, según la Agencia Nacional de Gestión de Residuos de Túnez, cada año, las almazaras tunecinas producen una media de 1 millón de toneladas de aguas residuales de las almazaras, junto con con unas 650.000 Tn de orujo de 3 fases (residuo con menor humedad que el

alpeorajo), unas 70.000 Tn de hojas y unas 150.000 Tn de lodos de alto valor energético derivados de la extracción del aceite residual, haciendo un total de 2.000.000 Tn de residuos de todo el territorio nacional (National Waste Management Agency, 2021). Esto ha llevado al Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible a elaborar un Plan de Acción Nacional para la gestión de las aguas residuales de las plantas industriales con el fin de promover su valorización. Se adoptó el tratamiento por evaporación natural, sujeto a las condiciones climáticas, y se construyeron grandes tanques de almacenamiento en grandes zonas de producción: uno en Sfax y otro en la localidad de El Kalaa. Sin embargo, a pesar de cumplir con las prescripciones técnicas para los tanques de recolección, la evaporación no es suficiente.

Además, el transporte de las aguas residuales desde las almazaras hasta los depósitos de almacenamiento requiere una gran flota de camiones cisterna, que no siempre están disponibles ya que el periodo de molienda de la aceituna es muy corto. Esta operación genera un coste adicional que los olivares no siempre pueden cubrir. Hoy en día, una parte de las aguas residuales de las almazaras se valoriza en la agricultura como fertilizante al esparcirlas en los huertos de arboricultura, especialmente los olivos.

El orujo resultante de la extracción en tres fases podría utilizarse directamente como combustible o entregarse a refinerías para la extracción de aceite de orujo de oliva. Este último, según su acidez se utiliza como aceite (si la acidez es inferior al 25%) o se utiliza para la fabricación de jabón (si la acidez es superior). En cuanto al hueso de aceituna obtenido tras la separación de la pulpa del orujo agotado, se utiliza localmente para calentar los secaderos o se vende o exporta.

En base a la información mencionada anteriormente, la cadena de suministro más representativa de Túnez en la fase de cultivo se caracteriza por un cultivo extensivo con un 95% de secano en fase agraria. La cadena de suministro más representativa de la fase industrial del aceite de oliva se basa en la predominancia de almazaras que utilizan el sistema continuo de 3 fases para el proceso de producción de aceite de oliva y el tratamiento de sus respectivos residuos, especialmente alpechín, que se vierte mayoritariamente sobre campos de cultivo o se seca en tanques destinados al efecto.

1.2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Una vez expuesta la situación en la que se encuentra la cadena de producción de aceite de oliva en España y Túnez, como países representativos de dicha producción dentro y fuera de la Unión Europea, se han elaborado las siguientes hipótesis, que justifican esta tesis, así como el objetivo general y los objetivos específicos de la investigación.

1.2.1. HIPÓTESIS

Las hipótesis que se plantean en este trabajo, y sobre las que versan los artículos publicados se describen a continuación:

Hipótesis 1: La cadena productiva del aceite de oliva genera una serie de subproductos y residuos, que generan un impacto medioambiental significativo debido a su tratamiento, que no ha sido optimizado.

Hipótesis 2: Los costes de tratamiento de los residuos de cada almazara aumentan debido a la necesidad de tratamiento de los subproductos, lo que se traduce en una mayor carga económica y medioambiental en toda la cadena de valor.

Hipótesis 3: Durante la fase productiva se deben incorporar buenas prácticas agrícolas para minimizar los impactos ambientales y económicos, como la elección de la forma de cultivo, la densidad de plantación, el sistema de riego adaptado y las operaciones de fertilización, poda, control químico de plagas, cosecha, extracción de aceite y tratamiento de subproductos y residuos.

Hipótesis 4: Es conveniente mejorar la cadena de producción del aceite de oliva mediante un proyecto adecuado y respetuoso con el medio ambiente. Para tal fin, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología relevante que permite caracterizar el impacto medioambiental y ofrece la posibilidad de mejorar la situación actual.

1.2.2. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general que se plantea en esta tesis doctoral, además de contrastar las hipótesis expuestas, consiste en caracterizar el impacto ambiental de los escenarios

más representativos de la cadena productiva del aceite de oliva y proponer un escenario que minimice dicho impacto a través de un proyecto de gasificación de la biomasa.

1.2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El propósito final de esta investigación se puede completar con los siguientes objetivos específicos:

Objetivo 1: describir el estado del arte de la cadena productiva del aceite de oliva y las técnicas actuales de tratamiento de subproductos y residuos en España, el mayor productor de aceite de oliva de la UE, y en Túnez, un país representativo no perteneciente a la UE.

Objetivo 2: realizar un ACV de la producción de aceite de oliva con diferentes condicionantes (país, sistema de cultivo, sistema de extracción, tratamiento de residuos), determinando los procesos de mayor impacto y evaluando las mejoras propuestas.

Objetivo 3: identificar y proponer proyectos con tecnologías innovadoras y maduras que puedan aplicarse a la valorización de subproductos y residuos del olivar, con el fin de minimizar el impacto ambiental que se genera actualmente;

1.2.4. RESULTADOS ESPERADOS

Con el alcance de los objetivos, se lograrán los siguientes resultados esperados:

- Proporcionar información útil para las asociaciones locales de productores de aceite de oliva en España y Túnez para cambiar sus hábitos hacia soluciones más sostenibles y mejorar la cadena de valor en cada localización y sistema.
- Mejorar la calidad del suelo y el agua, así como minimizar el impacto ambiental derivado de la producción de aceite de oliva, con un uso limitado y eficiente de energía, agua y productos químicos (pesticidas y fertilizantes).
- Mejorar los ingresos de los agricultores y productores de aceite de oliva a través del acceso a nuevos mercados como la autoproducción y exportación de energía (térmica

y eléctrica), comercializadoras de biomasa, producción de biocombustibles y fertilizantes, dinamizando la economía rural.

1.3. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO GENERAL

Este apartado expone la metodología seguida en la investigación. Aunque serán abarcadas en mayor medida, en cada uno de los artículos, a continuación, se indican, de modo general, las fuentes de información empleadas, el proceso de revisión del estado del arte, las características del proceso empírico seguido y los procesos de modelización y análisis empleados.

1.3.1. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

La historia de los antecedentes que llevaron al LCA comenzó en 1960 cuando se produjo la primera crisis mundial del petróleo (Shi et al., 2015). Sin embargo, fue años después, en las décadas de 1970 y 1980, cuando se comenzaron a utilizar distintos métodos ("proto-LCAs") en varios países de Norteamérica y Europa. La Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (SETAC) comenzó a emplear varios "proto-LCA" y este proceso culminó en 1993 con la publicación de las "*Life Cycle Assessments: A code of Practice*" en un taller realizado en Sesimbra, Portugal (Klöppfer, 2006; Klöppfer and Grahl, 2014). Durante el mismo año comenzó la estandarización por parte de la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) involucrando a 40 naciones, dando como resultado la famosa serie de normas ISO LC 14040/44-2006 (ISO, 2006a, 2006b).

En las décadas de 1980 y 1990 se introdujeron modelos completos de evaluación del impacto del ciclo de vida y de costes del ciclo de vida, y el LCA social, que fueron ganaron terreno en la primera década del siglo XXI. Durante la última década, el LCA (ambiental) se ha ampliado para incluir la economía (costo del ciclo de vida-LCC) y la equidad social (S-LCA) basándose en el modelo de sostenibilidad de tres pilares. "LCSA amplía el alcance del LCA para cubrir las tres dimensiones de la sostenibilidad (personas, planeta y prosperidad) (Guinée, 2016; Valdivia et al., 2013). Centrándonos en la evaluación del impacto ambiental, el LCA es hoy en día una metodología importante y probada para evaluar diferentes impactos ambientales o el ciclo de vida completo de un producto, material, actividad o proceso, también usado para promover

el ahorro de recursos y la mejora del comportamiento ambiental (Shi et al., 2015). En otras palabras, LCA es una técnica de análisis para evaluar los impactos ambientales asociados con todas las etapas de la vida de un producto, que van desde la extracción de materia prima hasta el procesamiento de materiales, fabricación, distribución y uso. Actualmente, muchos estudios científicos están explorando la aplicación de LCA en muchos sectores diferentes: construcción de edificios (Anand and Amor, 2017; Dandres et al., 2011; Häfliger et al., 2017), sector energético (Casson et al., 2019; Marvuglia et al., 2013), agua (Amores et al., 2013; Loubet et al., 2014; Vince et al., 2008), etc. Y, como no podía ser de otra forma, el ACV también es una herramienta muy útil para analizar el impacto y la sostenibilidad de la cadena de suministro de productos de la industria agroalimentaria, incluido el aceite de oliva (Cellura et al., 2012b; Espadas-Aldana et al., 2019).

El ACV del sector productor de aceite de oliva se basa en las ya mencionadas normas ISO 14040 e ISO 14044 como marco general. Más concretamente, y desarrollado como parte de la estrategia europea 2020 “Una Europa eficiente en recursos”, en abril de 2013, la Comisión Europea publicó la metodología “Product and Organisation Environmental Footprint” (en adelante PEF/OEF), que se asentaba sobre el ACV, basada en el desempeño ambiental de productos, servicios y organizaciones (Diario Oficial de la Unión Europea, 2013). En junio de 2014, como parte del desarrollo de las directrices para el cálculo de la huella ambiental, la CE inició 11 proyectos piloto para el desarrollo de reglas de categoría de huella ambiental de producto (del inglés *Product Environmental Footprint Category Rules*, en adelante, PEFCR) para alimentos, piensos y bebidas, incluido el aceite de oliva.

En resumen, los PEFCR son una extensión necesaria y un complemento de la orientación más general para los estudios de huella ambiental y ayudan a centrar la atención en los parámetros más importantes del estudio, lo que también reduce el tiempo, el esfuerzo y los costos. El ACV y la huella ambiental de los productos entran en una nueva era con el PEF y este estudio claramente se mueve en esa dirección aplicando el LCA en cumplimiento de las reglas incluidas en el PEFCR para aceite de oliva (Schau et al., 2016), como se muestra en secciones posteriores.

Una parte integral de un LCA es la producción de un inventario de ciclo de vida (del inglés *Life Cycle Inventory* (en adelante LCI), que enumera las entradas y salidas asociadas con el sistema de producción en cada fase de estudio. El LCI es la fase más determinante del LCA, ocupándose de la cuantificación y acumulación de datos de entrada y salida de un sistema (Islam et al., 2016). En otras palabras, el LCI se define

como una fase del LCA que involucra la compilación y cuantificación de entradas y salidas para un sistema de producto determinado a lo largo de su ciclo de vida (ISO, 2006b). El concepto de LCI se adoptó para la producción más limpia desde la década de 1960 y ha tenido una amplia aplicación industrial y académica en las últimas décadas (Suh and Huppel, 2005; Vigon et al., 1993).

En la literatura científica abundan los trabajos sobre ACV aplicados al sector del aceite de oliva. Sin embargo, la mayoría de ellos se centran en la fase agrícola de la producción de aceite de oliva. Solo un número limitado de publicaciones científicas abordan la evaluación del desempeño ambiental de las tecnologías de conversión de biomasa aplicadas a la cadena de valor de los aceites de oliva vírgenes. Entre los diferentes procesos de conversión termoquímica, la gasificación de biomasa se considera una de las mejores tecnologías disponibles para la generación simultánea de electricidad y calor (cogeneración) a partir de subproductos de la cadena de suministro del aceite de oliva, ya que esta tecnología reduce la cantidad de subproductos indeseables de la producción de aceite de oliva. En los procesos de gasificación, un combustible sólido carbonoso, como es el orujo de aceituna, se oxida parcialmente y se convierte en un combustible gaseoso, normalmente denominado gas productor o gas de síntesis (syngas). La materia prima, que contiene un alto contenido de carbono requiere un agente gasificante (aire, oxígeno puro y/o vapor) para ser gasificada como resultado de una serie de reacciones químicas que requieren calor (endotérmicas) y liberan calor (exotérmicas). La gasificación con aire como agente gasificante se suele realizar en condiciones autotérmicas, lo que significa que las reacciones exotérmicas de combustión liberan suficiente calor para que se produzcan las reacciones endotérmicas responsables de la formación del gas productor. El gas productor de la gasificación, una vez enfriado y limpio, puede ser utilizado como combustible en motores a gas o microturbinas para la generación de energía eléctrica y/o térmica. Además de la generación distribuida de electricidad y calor para el autoconsumo, otro producto económica y ambientalmente valioso de la tecnología de gasificación es el *biochar* (también conocido como biocarbón, por su traducción al castellano), un material sólido carbonoso con numerosos beneficios para el suelo agrícola. En este sentido, el autoconsumo eléctrico se propone como la vía para reducir el impacto ambiental de la fase industrial en la cadena de valor del aceite de oliva.

Hay innumerables trabajos teóricos, experimentales o de simulación sobre la conversión termoquímica y bioquímica de la biomasa en la literatura científica. Sin embargo, se puede encontrar muy poca información específicamente sobre el desempeño ambiental

de las tecnologías de conversión termoquímica, como la gasificación de la biomasa en el sector del aceite de oliva. En el último artículo presente en esta tesis se comparan los impactos ambientales producidos en el escenario actual y más representativo en muchas zonas del mundo, incluida la gran mayoría de España y otras muchas regiones mediterráneas, y un nuevo escenario en el que se aplica la gasificación para el tratamiento de los residuos generados. No obstante, cabe señalar que los resultados de este trabajo no se limitan a una sola región o país, sino que pueden extenderse a cualquier cadena de valor de producción de aceite de oliva existente basada en el proceso de extracción de dos fases.

1.3.2. ESTUDIO EMPÍRICO

Los datos primarios necesarios para elaborar el LCI de este proyecto se han obtenido a través de encuestas a agricultores con explotaciones agrícolas de diferentes tamaños y responsables de cooperativas de aceite y almazaras, que representan las características de la producción de aceite de oliva en España y Túnez.

Los cuestionarios se elaboraron siguiendo las directrices del PEFRCR y fueron pre-testados para garantizar la validez de su contenido por técnicos agrícolas con experiencia en explotaciones oleícolas y por académicos con experiencia investigadora en este campo.

En consecuencia, se realizaron dos encuestas, una para evaluar la fase agraria, enviada a los agricultores, y otra para evaluar la fase industrial, realizada por las cooperativas o almazaras. Las encuestas han recabado información cualitativa y cuantitativa sobre las características de la producción, procesos, productos de entrada y salida, energía y residuos. Las encuestas se realizaron de manera presencial, telefónica y en ciertos casos visitando los cultivos e instalaciones para verificar la información proporcionada, siguiendo el ejemplo de Rajaeifar et al. (2014) y Guarino et al. (2019).

Las encuestas realizadas por los agricultores incluyen las superficies y la producción anual de cultivos de acuerdo con el Reglamento (CE) 543/2009 (Government of Spain, 2020).

Se calcularon los valores promedio para los encuestados. Estos valores están en relación a la superficie de cultivo del olivo y la masa de aceite de oliva obtenida, para la fase de cultivo y la fase industrial respectivamente. Se realizó en función a su tipo y

subtipo, garantizando una gama adecuada para cada categoría. En segundo lugar, se realizó un tratamiento estadístico para descartar valores falsos o no representativos, en base a los requisitos de calidad de datos del PEFCR (en inglés, *Data Quality Requirements*). Los datos obtenidos también fueron revisados y validados por las consultoras externas especializadas “CO2 consulting” y “Circular Carbon”.

Las encuestas se completaron para las cosechas comprendidas entre 2015 y a 2020 en España, mientras que en Túnez están referidas a la cosecha 2019-2020.

El alcance del sistema es del tipo “de la cuna a la puerta”, o como se conoce en inglés, “*cradle to gate*” (Schau et al., 2016). En él se estudian los productos, procesos, energía y transporte necesarios para obtener aceite de oliva, así como el tratamiento de residuos y las emisiones involucradas en todo el proceso productivo. En primer lugar, el estudio analiza los procesos existentes “aguas arriba”: entradas y salidas del sistema en la fase agrícola. En segundo lugar, el análisis profundiza en los procesos centrales o “núcleo”: entradas y salidas en los procesos de transformación de la fase industrial, considerando hasta aquí el tratamiento de residuos y la producción de subproductos. Finalmente, los procesos del ciclo de vida del producto posteriores a este alcance no están contemplados en el estudio, estos implican la distribución, el consumo, el tratamiento de residuos después del uso del aceite y sus respectivas entradas y salidas, estos procesos no son parte del estudio ya que están más allá del alcance de un análisis “de la cuna a la puerta”. El alcance de los capítulos 2, 3 y 4 puede observarse de forma sintetizada en la Fig. 1.4, mientras que el alcance en el capítulo 5, que abarca la conversión energética del orujillo, se refleja en la Fig. 1.5.

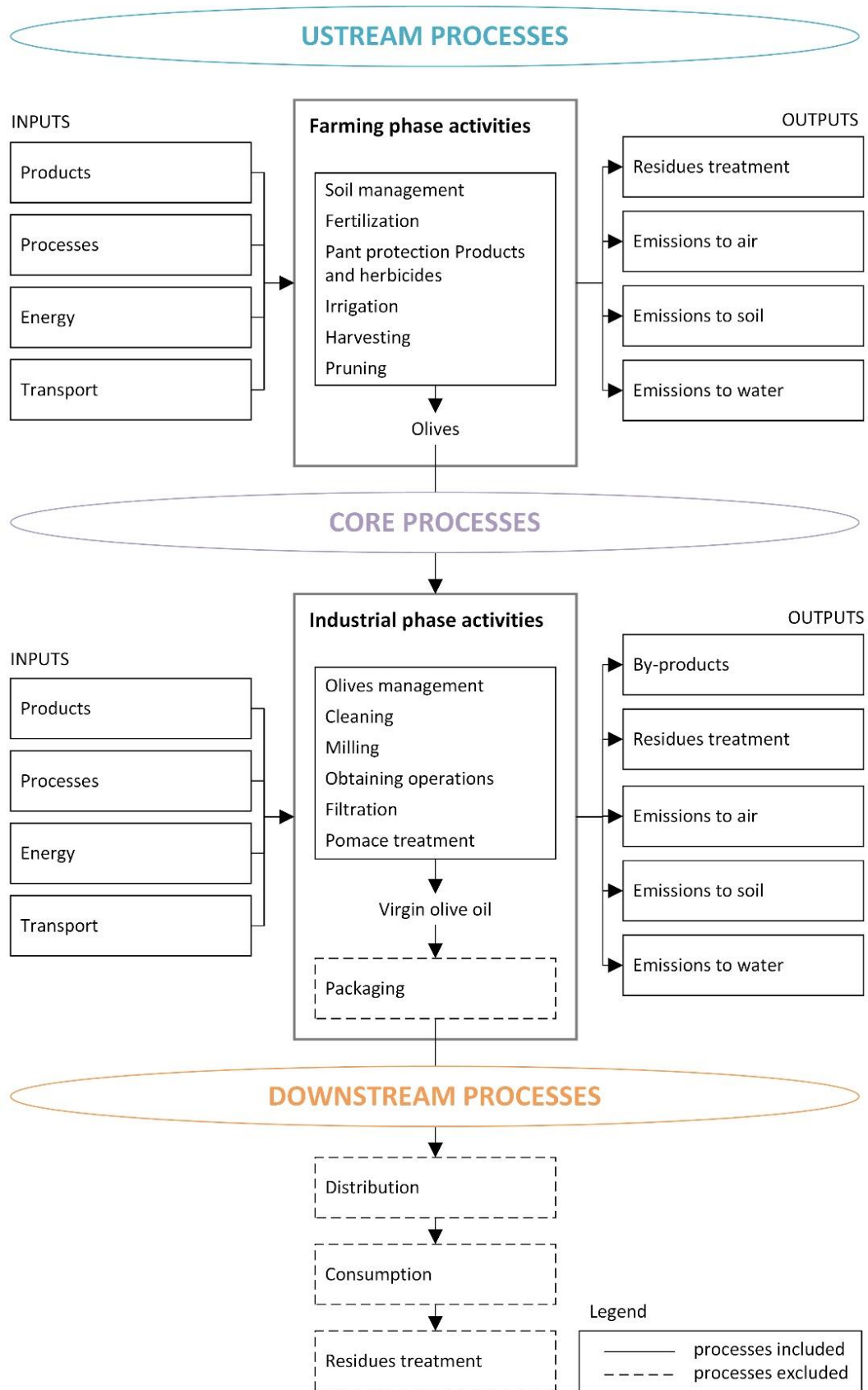


Fig. 1.4. Alcance del análisis de ciclo de vida en el estudio (Fernández-Lobato et al., 2021b).

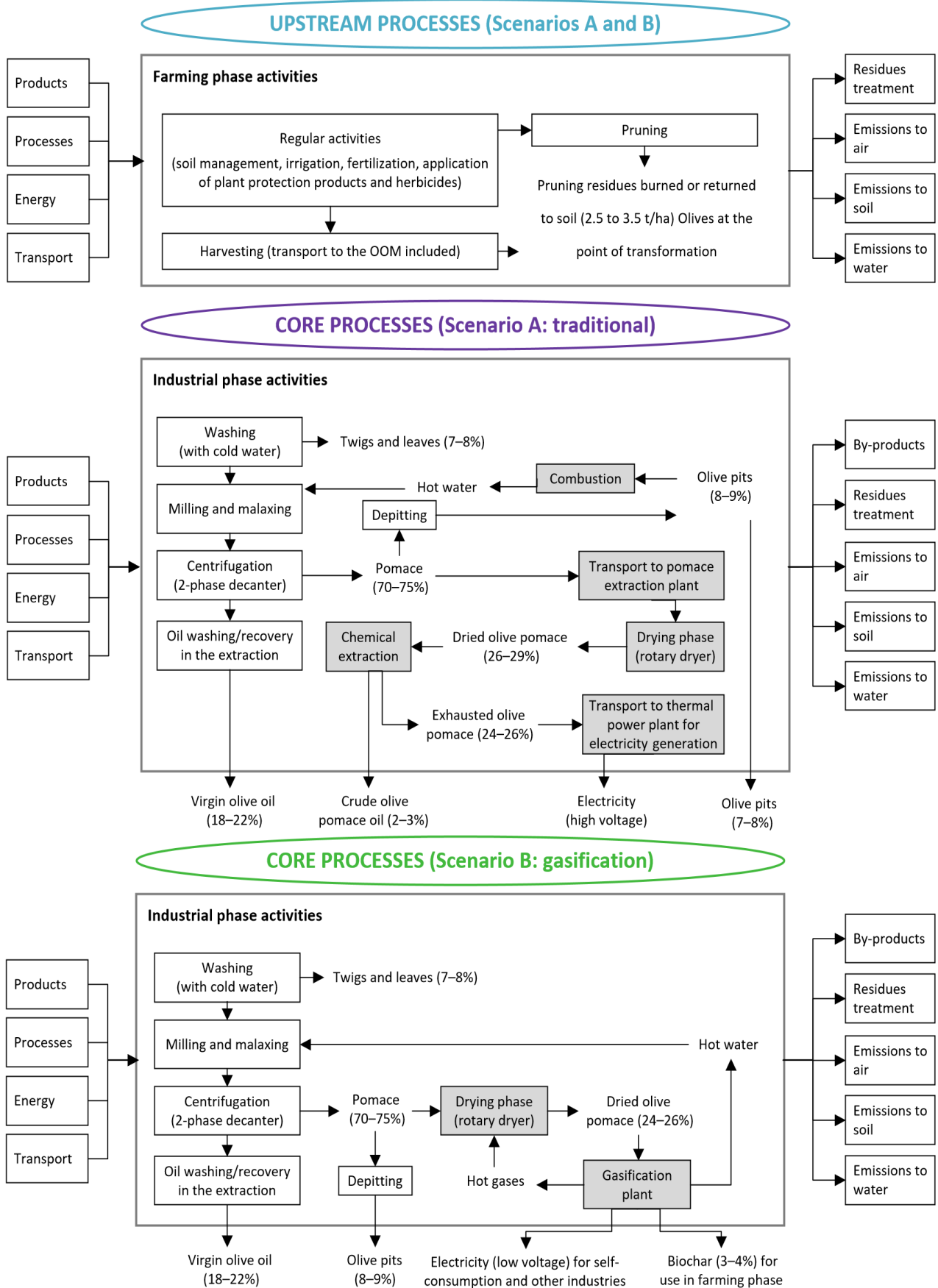


Fig. 1.5. Alcance del análisis de ciclo de vida, considerando la conversión energética del orujillo tradicional vs la gasificación en almazara (Fernández-Lobato et al., 2022).

La unidad funcional elegida en base a la cual se cuantifica el impacto ambiental es 1 kg de aceite de oliva virgen sin envasar en el punto de producción (almazara o cooperativa). En estudios de casos anteriores de LCA para la evaluación de los impactos de la producción de aceitunas y aceite de oliva, las unidades funcionales se relacionaron con 1 L, 0,75 L, 1 tonelada de aceite de oliva o 1 tonelada de aceitunas (Belaud and Clarens, 2012). Aunque lo más común en estos estudios es utilizar el litro, en este caso se ha definido la unidad de masa, en consonancia con otros autores como El Hanandeh and Gharaibeh (2016). En este sentido, cabe señalar que cuando se trata de aceite de oliva a nivel de producción, la cuantificación se realiza en unidades de masa, a diferencia del producto final destinado al consumo, que se compra por litros.

Los datos del inventario ambiental se han procesado mediante el software *SimaPro 9.0* ("Sistema para la Evaluación Ambiental Integrada de Productos"), que toma valores representativos de impacto ambiental de diferentes bases de datos (*ecoinvent 3.5, Agri-footprint 4.0, ELCD, Industry data 2.0, Methods*) y permite asociar valores para las emisiones y efluentes de los procesos. Este software permite crear un modelo ambiental con entradas y salidas basado en bases de datos científicas, monitoreando y analizando los procesos a través del método elegido de forma cuantitativa y sistemática: *ILCD midpoint 2011* (CML - Department of Industrial Ecology, 2016). Los resultados permiten reflejar el porcentaje y la cantidad de impacto ambiental en diferentes categorías para cada proceso, entrada y salida de la unidad funcional considerada (Desideri et al., 2014; Proietti et al., 2014).

Finalmente, este trabajo de investigación propone un enfoque novedoso para la gestión y valorización del orujo de oliva, donde el alpeorujo que se produce continuamente en almazaras se seca directamente en el lugar donde se genera, en lugar de transportarse a las orujeras para su posterior secado. Vale la pena señalar que en el enfoque de gestión actual para el alpeorujo genera pérdidas económicas considerables para los productores de aceite de oliva e impactos ambientales perjudiciales. Este trabajo presenta un enfoque novedoso que implica la instalación de una planta de gasificación integrada para la generación combinada de calor y energía (CHP).

Además de la generación de electricidad renovable para el autoconsumo de la almazara o la venta de excedentes, la planta de gasificación integrada produce adicionalmente dos flujos de calor residual del motor de gas: agua caliente y gases de escape calientes. Reciclar esta agua caliente residual permite abandonar la práctica actual de quemar una parte importante de la producción de hueso de aceituna, que luego puede venderse. Además, el calor necesario para el proceso de secado del alpeorujo se suministra

parcialmente a través de los gases de escape calientes que dejan el motor de combustión interna funcionando con gas procedente de la gasificación, mientras que los requisitos térmicos restantes se satisfacen quemando el orujillo en un horno auxiliar.

Otro subproducto típico de la tecnología de gasificación de tiro descendente es el biocarbón, un material sólido carbonoso con un potencial atractivo para el sector del aceite de oliva. La producción de biocarbón representa aproximadamente del 15 al 20 % en peso de la materia prima del gasificador y puede proporcionar numerosos beneficios al sector de la aceituna además de representar un contenido en carbono que queda almacenado en el suelo a largo plazo.

Los balances de masa y energía de la planta de gasificación integrada se realizaron en el simulador de procesos Aspen Plus con la ayuda de los datos de especificación de los fabricantes. En consecuencia, el modelo de la planta de extracción de aceite de orujo de oliva descrito en el apartado anterior se modificó ligeramente para incluir una fuente de energía térmica adicional a la del horno existente. Se consideró como base para la simulación del proceso una planta de gasificación de tamaño medio con una potencia eléctrica nominal de 500 kW, que permite gestionar unos 2.305 kg/h de alpeorajo para cogeneración además de la producción de biochar. Cabe señalar que las almazaras con una capacidad de producción media superior a 1.000-5.000 toneladas/año producen la mayoría (55%) del aceite de oliva virgen en España.

Los procesos y supuestos mostrados en los capítulos 5.2 a 5.4 se basan en la cadena de valor del aceite de oliva más representativa sin incluir la generación eléctrica proveniente de la biomasa. Sin embargo, el capítulo 5.5 se basa en bases de datos adicionales, modificando así el modelo del escenario tradicional actual en España (escenario A), que incluye el tratamiento del orujillo para la generación eléctrica en plantas de tratamiento de biomasa. El escenario B ya sí incluye las actividades relacionadas con la planta de gasificación propuesta, que reemplaza las actividades de tratamiento de alpeorajo y orujillo del escenario A, a la vez que el biocarbón obtenido como subproducto se deposita en el suelo agrícola del olivar.

1.4. ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN

Este trabajo de investigación se ha estructurado en siete capítulos. El presente sirve de introducción para mostrar el planteamiento general del mismo: importancia del tema a investigar, hipótesis de trabajo, objetivo general y objetivos específicos y el

planteamiento metodológico que guía la investigación. Asimismo, se justifica la unidad temática de la misma, ya que esta tesis doctoral no responde a una estructura clásica, sino que se basa en un compendio de publicaciones (o tesis por artículos), todas ellas siguiendo una línea argumental común y justificada y cumpliendo con los requisitos que se exigen a una tesis por compendio de publicaciones en la normativa de la Universidad de Jaén.

Tras el primer capítulo introductorio, cada uno de los siguientes cuatro capítulos conforman el estudio empírico de esta tesis, incluyéndose los artículos científicos publicados en revistas científicas situadas en el primer cuartil del *Journal Citation Report*. De este modo, los capítulos dos, tres y cuatro tratan del impacto de la cadena de valor del aceite de oliva en España del tipo tradicional (2), de los tipos extensivo y regadío (3), y de la cadena de valor en Túnez (4), mientras que el capítulo 5 desgana el efecto de la introducción de la tecnología de gasificación en dicha cadena de valor, para el caso de España. Es importante señalar que, debido a que las revistas internacionales en las que se han publicado los artículos se redactan en inglés, éste será el idioma vehicular de los artículos presentados en esta tesis doctoral.

Una vez expuestos los distintos estudios empíricos que conforman esta tesis doctoral, en el capítulo seis, también redactado en inglés, se presenta un resumen global de los resultados, y a continuación, las principales conclusiones que corroboran tanto las hipótesis principales del trabajo como la consecución de los diferentes objetivos planteados. Para finalizar, también se muestran los futuros trabajos de investigación que se plantean a partir de los resultados obtenidos.

1.5. BIBLIOGRAFÍA

2081/92, C.R. (EEC) N., 1992. On the protection of geographical indications and designations of origin for agricultural products and foodstuffs. Off. J. Eur. Communities L208, 1–8.

Amores, M.J., Meneses, M., Pasqualino, J., Antón, A., Castells, F., 2013. Environmental assessment of urban water cycle on Mediterranean conditions by LCA approach. *J. Clean. Prod.* 43, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.033>

- Anand, C.K., Amor, B., 2017. Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.058>
- Belaud, J.-P., Clarens, F., 2012. Life Cycle Assessment of olive oil production in France. 4th Int. Conf. Eng. Waste Biomass Valorisation.
- Casson, A., Beghi, R., Giovenzana, V., Fiorindo, I., Tugnolo, A., Guidetti, R., 2019. Visible near infrared spectroscopy as a green technology: An environmental impact comparative study on olive oil analyses. *Sustain.* 11. <https://doi.org/10.3390/su11092611>
- Castro, J., Orgaz Rosúa, F., Fereres Castiel, E., Vega Macías, V., Pastor Muñoz-Cobo, M., Hidalgo, J., Mariscal, M.J., 1999. Respuestas del olivar tradicional a diferentes estrategias y dosis de agua de riego.
- Cellura, M., Longo, S., Mistretta, M., 2012. Life Cycle Assessment (LCA) of protected crops: An Italian case study. *J. Clean. Prod.* 28, 56–62. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.021>
- CML - Department of Industrial Ecology, 2016. CML-IA Characterisation Factors - [WWW Document]. URL <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors#downloads> (accessed 1.23.20).
- Cruz-Peragón, F., Palomar, J.M., Ortega, A., 2006. Ciclo energético integral del sector oleícola en la provincia de Jaén (España). *Grasas y Aceites* 57, 219–228.
- Dandres, T., Gaudreault, C., Tirado-Seco, P., Samson, R., 2011. Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Constr. Build. Mater.* 15, 3121–3132. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012>
- Desideri, U., Arcioni, L., Leonardi, D., Cesaretti, L., Perugini, P., Agabiti, E., Evangelisti, N., 2014. Design of a multipurpose “zero energy consumption” building according to European Directive 2010/31/EU: Life cycle assessment. *Energy Build.* 80, 585–597. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.027>
- DGPA, 2020. MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DES RESSOURCES HYDRAULIQUES DE LA TUNISIE - DGPA (Direction Générale de la Production Agricole) - Biobase, base de données documentaire en AB [WWW Document]. URL

https://abiodoc.docressources.fr/index.php?lvl=publisher_see&id=2268 (accessed 3.11.21).

Diario Oficial de la Unión Europea, 2013. 2013/179/UE: Recomendación de la Comisión, de 9 de abril de 2013, sobre el uso de métodos comunes para medir y comunicar el comportamiento ambiental de los productos y las organizaciones a lo largo de su ciclo de vida.

El Hanandeh, A., Gharaibeh, M.A., 2016. Environmental efficiency of olive oil production by small and micro-scale farmers in northern Jordan: Life cycle assessment. *Agric. Syst.* 148, 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2016.08.003>

Espadas-Aldana, G., Vialle, C., Belaud, J.-P.P., Vaca-Garcia, C., Sablayrolles, C., 2019. Analysis and trends for Life Cycle Assessment of olive oil production. *Sustain. Prod. Consum.* 19, 216–230. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.04.003>

European Union, 2006. Council regulation (EC/510/2006). *Off. J. Eur. Union* 2006, 12–25.

Fernández-Lobato, L., López-Sánchez, Y., Blejman, G., Jurado, F., Moyano-Fuentes, J., Vera, D., 2021. Life Cycle Assessment of the Spanish virgin olive oil production: a case study for Andalusian region. *J. Clean. Prod.* 290, 125677. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125677>

Fernández-Lobato, L., Aguado, R., Jurado, F., & Vera, D. (2022). Biomass gasification as a key technology to reduce the environmental impact of virgin olive oil production: A Life Cycle Assessment approach. *Biomass and Bioenergy*, 165, 106585. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2022.106585>

Food Information and Control Agency, 2021. Olive oil market information [WWW Document]. URL <http://www.aica.gob.es/> (accessed 10.20.21).

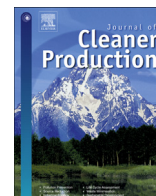
García-González, D.L., Aparicio, R., 2010. Research in olive oil: Challenges for the near future. *J. Agric. Food Chem.* 58, 12569–12577. <https://doi.org/10.1021/jf102735n>

García-Maraver, A., Zamorano, M., Ramos-Ridao, A., Díaz, L.F., 2012. Analysis of olive grove residual biomass potential for electric and thermal energy generation in Andalusia (Spain). *Renew. Sustain. Energy Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.040>

- Goldhamer, D.A.A., Dunai, J., Ferguson, L.F.F., 1994. IRRIGATION REQUIREMENTS OF OLIVE TREES AND RESPONSES TO SUSTAINED DEFICIT IRRIGATION, in: *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, pp. 172–175. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1994.356.36>
- Government of Spain, 2020. Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos.
- Guarino, F., Falcone, G., Stillitano, T., De Luca, A.I., Gulisano, G., Mistretta, M., Strano, A., 2019. Life cycle assessment of olive oil: A case study in southern Italy. *J. Environ. Manage.* 238, 396–407. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.006>
- Guinée, J., 2016. Life Cycle Sustainability Assessment: What Is It and What Are Its Challenges?, in: Clift, R., Druckman, A. (Eds.), *Taking Stock of Industrial Ecology*. Springer, pp. 45–68. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20571-7>
- Häfliger, I.F., John, V., Passer, A., Lasvaux, S., Hoxha, E., Saade, M.R.M., Habert, G., 2017. Buildings environmental impacts' sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials. *J. Clean. Prod.* 156, 805–816. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.052>
- International Olive Oil Council, 2019. Huiles D ' Olive - Olive Oils [WWW Document]. Int. Olive Counc. URL <https://www.internationaloliveoil.org/> (accessed 10.17.19).
- Islam, S., Ponnambalam, S.G., Lam, H.L., 2016. Review on life cycle inventory: methods, examples and applications. *J. Clean. Prod.* 136, 266–278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.144>
- ISO, 2006a. ISO 14044: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. Geneva, Switzerland.
- ISO, 2006b. ISO 14040—Environmental management—life cycle assessment—principles and framework. Geneva, Switzerland.
- Junta de Andalucía, 2015. Plan director del olivar andaluz. Consejería de Agricultura y Pesca.
- Klöpffer, W., 2006. The role of SETAC in the development of LCA. *Int. J. Life Cycle Assess.* 11, 116–122. <https://doi.org/10.1065/lca2006.04.019>

- Klöpffer, W., Grahl, B., 2014. Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice, Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice. <https://doi.org/10.1002/9783527655625>
- Loubet, P., Roux, P., Loiseau, E., Bellon-Maurel, V., 2014. Life cycle assessments of urban water systems: A comparative analysis of selected peer-reviewed literature. *Water Res.* 67, 187–202. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.048>
- Mariscal, M.J., Lavado, M., Moñino, M.J., Prieto, M.H., 2000. Olive tree (*Olea europaea* L. cv. "Morisca") response to sustained deficit irrigation in Extremadura. *Acta Hortic.* 917–922.
- Marvuglia, A., Benetto, E., Rege, S., Jury, C., 2013. Modelling approaches for consequential life-cycle assessment (C-LCA) of bioenergy: Critical review and proposed framework for biogas production. *Renew. Sustain. Energy Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.031>
- Ministry of Agriculture Fisheries and Food, 2020. Areas and annual crop production 2020, Spanish government.
- National Waste Management Agency, Ang., 2021. Publications.
- Olive Oil Council, 2020. General description of olive growing in Tunisia [WWW Document]. URL https://www.internationaloliveoil.org/wp-content/uploads/2019/11/ENGLISH_POLICY_TUNISIA-2012_OK.pdf (accessed 9.16.22).
- Proietti, S., Sdringola, P., Desideri, U., Zepparelli, F., Brunori, A., Ilarioni, L., Nasini, L., Regni, L., Proietti, P., 2014. Carbon footprint of an olive tree grove. *Appl. Energy* 127, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.019>
- Rajaeifar, M.A., Akram, A., Ghobadian, B., Rafiee, S., Heidari, M.D., 2014. Energy-economic life cycle assessment (LCA) and greenhouse gas emissions analysis of olive oil production in Iran. *Energy* 66, 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.12.059>
- Regional Government of Andalusia, 2015. Director plan of the olive grove. Consejería de Agricultura y Pesca.

- Russo, C., Cappelletti, G.M., Nicoletti, G.M., Michalopoulos, G., Pattara, C., Palomino, J.A.P., Tuomisto, H.L., 2016. Product environmental footprint in the olive oil sector: State of the art. *Environ. Eng. Manag. J.* 15, 2019–2027. <https://doi.org/10.30638/eemj.2016.218>
- Schau, E.M., Palomino, J.A.P., Michalopoulos, G., Russo, C., 2016. Product Environmental Footprint Category Rules for Olive Oil. Draft for 3rd public consultation phase.
- Shi, J., Liu, Z., Zhang, H., Jiang, Q., Li, T., 2015. Life Cycle Assessment: State of the Art and Future Perspectives. *Recent Patents Mech. Eng.* 8, 211–221. <https://doi.org/10.2174/2212797608666150729231737>
- Suh, S., Huppel, G., 2005. Methods for life cycle inventory of a product. *J. Clean. Prod.* 13, 687–697. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2003.04.001>
- The Council of the European Union, 2001. Regulation (EC) No 1513/2001 of 23 July 2001 amending Regulations No 136/66/EEC and (EC) No 1638/98 as regards the extension of the period of validity of the aid scheme and the quality strategy for olive oil. *Off. J. Eur. Communities* 1–8.
- Valdivia, S., Ugaya, C.M.L., Hildenbrand, J., Traverso, M., Mazijn, B., Sonnemann, G., 2013. A UNEP/SETAC approach towards a life cycle sustainability assessment - Our contribution to Rio+20. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 1673–1685. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0529-1>
- Vera, D., Jurado, F., Mena, B. De, Hernández, J.C., 2019. A Distributed Generation Hybrid System for Electric Energy Boosting Fueled with Olive Industry Wastes 1, 1–18. <https://doi.org/10.3390/en12030500>
- Vigon, B.W., Toole, D.A., Cornaby, B.W., Latham, H.C., Harrison, C.L., Boguski, T.L., Hunt, R.G., Sellers, J.D., 1993. Life-Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles.
- Vince, F., Aoustin, E., Bréant, P., Marechal, F., 2008. LCA tool for the environmental evaluation of potable water production. *Desalination* 220, 37–56. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.021>
- Visor SigPac V 4.8 [WWW Document], n.d. URL <https://sigpac.mapama.gob.es/fega/visor/> (accessed 9.14.22).



Life cycle assessment of the Spanish virgin olive oil production: A case study for Andalusian region



L. Fernández-Lobato ^a, Y. López-Sánchez ^b, G. Blejman ^c, F. Jurado ^a, J. Moyano-Fuentes ^d, D. Vera ^{a,*}

^a Department of Electrical Engineering, Escuela Politécnica Superior, University of Jaén, 23700, Linares, Spain

^b Laboratory of Analysis and Innovation in Tourism (LAIInnTUR), Department of Economics, University of Jaén, Jaén, Spain

^c Circular Carbon GmbH, Spain

^d Department of Business Organization, Marketing and Sociology, Escuela Politécnica Superior, University of Jaén, 23700, Linares, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 July 2020

Received in revised form

3 December 2020

Accepted 23 December 2020

Available online 29 December 2020

Handling editor: Zhifu Mi

Keywords:

Life cycle assessment

Olive farming

Virgin olive oil

Pomace treatment

Carbon sequestration

ABSTRACT

Spain is the first olive oil producer worldwide (representing around 45%), with more than 80% of its agricultural area dedicated to this crop. The goal of this study is to assess the environmental impact of the Spanish virgin olive oil production, attending to the farming and industrial phases. A Life Cycle Assessment (LCA) is conducted for 5 harvests in approximately 4,000 ha of olive grove in Jaén, the largest producer region of Spain. The type of farming is the most representative in Spain: conventional (non-organic), with a medium-low slope, extensive (100–150 trees per ha) and around 60% dryland orchards. The industrial phase is based on 2-phase extraction process and olive pomace valorization. The functional unit (FU) chosen for the comparative analysis is 1 kg of unpacked virgin olive oil under a perspective from “cradle to gate”. One of the most representative categories, climate change, places the average environmental impact in 2.43 kg CO₂ eq/kg, while the range is between 1.93 and 3.00 kg CO₂ eq/kg depending on the harvest. Huge differences between values are observed in the farming phase and they are mostly caused by the virgin olive oil yield of every harvest. The carbon sequestration analyses and the impact produced per FU ranges from 43.78% (for 15/16 harvest) to 46.36% (for 17/18). The impact hotspots detected in the farming phase, in terms of climate change potential, are the categories of plant protection products and herbicides (24.11% of the average value) and fertilizers (20.01%). However, the environmental impact of the industrial phase is relatively constant, with a value of 0.547–0.554 kg of CO₂ equivalent. The 80.74% is caused by pomace valorization, which translated to the average whole value, represents the 18.56%.

© 2020 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Europe is the first producer, exporter and consumer of olive oil worldwide (holds a 66% share of the global consumption). In fact, world olive oil production reached an average of 2.86 million tons in the period between 2005/06 and 2017/18, and 71.1% of it was produced in the European Union (EU). In terms of production, three Mediterranean countries cover almost the entire EU production of olive oil, with 2 million tons approximately (94.23% of EU olive oil production in the period 2015/20): Spain, Italy and Greece, with 63.14%, 17.34% and 13.75% of the EU production respectively

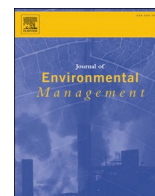
(European Commission, 2020; International Olive Oil Council, 2019a; Mili and Bouhaddane, 2019).

Different issues related to the environmental impact of olive oil production have reached significant institutional and scientific momentum for over a decade (Beaufoy, 2000; Giovenzana et al., 2019; Souilem et al., 2017). In particular, a tool for obtain objective values of the environmental impact produced by the life cycle of a product is the Life Cycle Assessment (LCA) (Curran, 1996), and the olive oil sector analyzed through LCA is becoming increasingly important (Bañas et al., 2017; Espadas-Aldana et al., 2019; Salomone et al., 2015; Salomone and Ioppolo, 2012).

LCA in the olive oil production sector has been traditionally based on ISO 14040 and ISO 14044 standards. In 2014, following with the development of the environmental footprint framework, the EC launched 11 pilot projects for the elaboration of Product

* Corresponding author.

E-mail address: dvera@ujaen.es (D. Vera).



Life cycle assessment, C footprint and carbon balance of virgin olive oils production from traditional and intensive olive groves in southern Spain

L. Fernández-Lobato^a, R. García-Ruiz^b, F. Jurado^a, D. Vera^{a,*}

^a Department of Electrical Engineering, Escuela Politécnica Superior, University of Jaén, 23700, Linares, Spain

^b Departamento de Biología Animal, Vegetal y Ecología, Universidad de Jaén, Paraje las lagunillas s/n, 23071, Jaén, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:

Life cycle assessment
Olive oil production
Environmental impacts
Carbon balance
Carbon footprint

ABSTRACT

Olive oil production shapes the socio-economic and environmental life of many areas of the Mediterranean basin, especially southern Spain, the highest olive oil-producing region worldwide. Olive grove cultivation is tending to intensify from traditional low-density to intensive and high-density cropping systems, which might result in higher environmental impacts. The aim of this study is to estimate the environmental impacts, carbon (C) footprint and carbon balance of producing virgin origin olive oil in Spain from four traditional rainfed, four irrigated, and three intensive olive farms, including the processing phase. Environmental impacts of producing 1 kg of unpacked virgin olive oil at the farm and industrial phases were quantified with the Life Cycle Assessment (LCA) tool and a "cradle-to-gate" approach using data from surveys at these farms and 12 olive oil mills. On average, the farming phase accounted for 76.3% of the EIs. Therefore, to reduce the impact of the virgin olive oils production, most of the efforts should be made especially in the farming phase. Despite the high variability between seasons and between independent replicates of the same farming system, intensive farming had significant higher impacts on most environmental impact categories than traditional rainfed farming, mainly due to the application of nitrogen fertilizer, plant protection products and herbicides. In terms of climate change, the environmental impact of the functional unit is in the ranges of 1.80–2.41, 1.59–2.78 and 2.28–3.26 kg of CO₂ eq. for traditional rainfed, irrigated and intensive, respectively. C footprint was negative and averaged –5.5, –4.3 and –2.7 kg CO₂ eq. Olive groves are efficient atmospheric CO₂ sinks mainly by fixing CO₂ into permanent and non-permanent trees structures. The lower intensification of the traditional rainfed groves contributed more in mitigating the increase of atmospheric CO₂. Finally, the C footprint and C balance are negative, especially in traditional irrigated and intensive farming. The application of organic sources of fertilizer and the implementation of temporary spontaneous cover crops, both technically and economically feasible, are sound strategies to achieve a positive carbon balance and reduce the impacts of olive cultivation.

1. Introduction

The olive tree (*Olea europaea* L), an evergreen and long-lived species, has been cultivated in the Mediterranean basin since ancient times. Olive tree cultivation has been traditionally linked with the diet, the culture and the economy of many areas of the Mediterranean basin, and the olive sector is still a key element of the European Union (EU) today (Giourga and Loumou, 2003). Indeed, olive cultivation is considered a main component of socio-economic and cultural life, preventing rural depopulation and shaping the natural rural landscapes of many of the main producer countries. Regarding future trends, the global market for olives is forecast to grow at a CAGR (Compound Annual Growth Rate) of

4.5% in the period 2019–2024. (European Commission, 2018; Mili and Bouhaddane, 2019).

The EU is the world's leading olive oil producer, and Spain devotes 2.5 million ha with more than 180 million trees to this crop. Consistently, the countries with the highest yearly average production (2015–2019) of olive oil are Spain, Italy and Greece with 1.2 10⁶ tons, 0.31 10⁶ tons and 0.277 10⁶ tons, respectively (International Olive Oil Council, 2019). Within Spain, the Andalusian region (southern Spain) accounts for about 1.5 million hectares and about 80% of Spanish production (Ministry of Agriculture Fisheries and Food, 2020).

Increased olive oil demand has acted as a catalyst for the intensification and expansion of olive groves. The intensification of low-input

* Corresponding author.

E-mail address: dvera@ujaen.es (D. Vera).

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112951>

Received 7 February 2021; Received in revised form 4 May 2021; Accepted 28 May 2021

Available online 4 June 2021

0301-4797/© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.



Contents lists available at ScienceDirect

Sustainable Production and Consumption

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

Life cycle assessment of the most representative virgin olive oil production systems in Tunisia

L. Fernández-Lobato^a, Y. López-Sánchez^b, R. Baccar^c, M. Fendri^c, D. Vera^{a,*}

^a Department of Electrical Engineering, Escuela Politécnica Superior, University of Jaén, 23700 Linares, Spain

^b Laboratory of Analysis and Innovation in Tourism (LAniTUR), Department of Economics, University of Jaén, Jaén, Spain

^c Olive Institute, Station régionale de Tunis, Avenue de l'Indépendance, 2049 Ariana, 2049 Tunis, Tunisia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 December 2021

Received in revised form 30 May 2022

Accepted 1 June 2022

Available online 8 June 2022

Editor: Dr. Cécile Bessou

Keywords:

Life Cycle Assessment
Life Cycle Inventory
Olive cultivation
Environmental impacts
Tunisia

ABSTRACT

This study aims to analyze the environmental impacts of Tunisian olive oil production using a “cradle to gate” Life Cycle Assessment (LCA) in order to quantify, compare and establish the most environmentally sustainable practices. This is the first LCA study in Tunisia that covers together the agricultural and industrial activities of one of their most important product value chains. This analysis considers the main olive grove cultivation systems in Tunisia (extensive, intensive, and super intensive) as well as the main extraction systems (press, 3-phase and 2–3 phase combined system). Sixteen categories of environmental impact were assessed following the guidelines set down by the “Product Environmental Footprint Category Rules” for olive oil established by the European Commission. Through the results obtained, it is possible to identify which is the most impactful of the main types of cultivation and extraction systems considered for every impact category individually. As representative values, the impact in climate change category for the most representative value chain (extensive crops and 3 phase extraction) is 3.29 kg CO₂ eq. per kg of olive oil without considering biogenic C and 3.53 kg CO₂ eq. if biogenic C is considered. The study determines that agricultural activities represent the heaviest contribution in all impact categories for the most representative value chain (from 84.7 % in photochemical ozone formation to 99.9 % in land use). Therefore, efforts should be focused on reducing the impact of the agricultural stage and reaching a high olive oil yield to reduce the overall environmental impact. For that reason, the study proposes to improve efficiency in the agricultural field and continue the investments in the presence of the 2–3 phase combined system.

© 2022 Institution of Chemical Engineers. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Agriculture and climate change (CC) are strongly correlated, characterized by a complex cause-effect relationship (Agovino et al., 2019; McCarl, 2010). Therefore, food and agriculture are fundamental pillars of the 2030 Agenda for Sustainable Development, the successor to the Millennium Development Goals (MDGs), including the 17 Sustainable Development Goals (SDGs) containing 169 specific targets, adopted by

the United Nations General Assembly in September 2015 (United Nations, 2015). The UN Food and Agriculture Organization (FAO) reports established that achieving the target of SDGs by 2030 to eradicate hunger is still going to be difficult (FAO, 2016). However, in order to move in the right direction, it is necessary to accept that agriculture has a mayor role to play in combating CC and it is actions and policies need to be implemented urgently to reduce the effects derived from climate variability (Arora, 2019; UNFCCC, 2021).

When analyzing the role of olive groves in global agricultural, it should be noted that, according to FAO statistics (FAO, 2021), the land area occupied by olive groves currently amounts to approximately 11 million hectares globally. Olive groves are present in fifty-eight countries, while the global annual production of olive oil is almost 20 million tonnes. Olive oil production is an important agricultural activity and the primary drive of the economy of many Mediterranean countries, prominent among which is Tunisia. Production of olives is an important part of the Tunisian agro-food sector; indeed, the olive oil sector contributes to Tunisian socio-economic development by providing 50 million

Abbreviations: AA, acidification; CC, climate change; DQR, data quality rating; FET, freshwater ecotoxicity; FE, freshwater eutrophication; FU, functional unit; HT, human toxicity; IR, ionizing radiation; LU, land use; LCA, Life Cycle Assessment; LCI, Life Cycle Inventory; ME, marine eutrophication; MFRD, mineral, fossil & renewable resource depletion; OOM, olive oil mill; OD, ozone depletion; PM, particulate matter; POF, photochemical ozone formation; PPP, plant protection products; PEFCC, product environmental footprint category rules; TE, terrestrial eutrophication; VOO, virgin olive oil; WD, water resource depletion.

* Corresponding author.

E-mail address: dvera@ujaen.es (D. Vera).



Research paper

Biomass gasification as a key technology to reduce the environmental impact of virgin olive oil production: A Life Cycle Assessment approach

Lázuli Fernández-Lobato, Roque Aguado, Francisco Jurado, David Vera*

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Escuela Politécnica Superior de Linares, Universidad de Jaén, Avda. de la Universidad s/n, 23700, Linares, Jaén, Spain



ARTICLE INFO

Keywords:

Olive pomace
Life cycle assessment (LCA)
Climate change
Downdraft gasifier
Combined heat and power (CHP)
Biochar

ABSTRACT

The olive oil value chain faces nowadays important challenges toward environmental sustainability, both in terms of waste management and energy efficiency improvement. This research work proposes an integrated gasification plant fueled with olive pomace for combined heat and power (CHP) generation and biochar production, which can be installed directly at oil mills. An alternative scenario for olive oil production incorporating the gasification technology was compared to a baseline scenario based on traditional olive oil production. The environmental impacts of producing 1 kg of unpacked virgin olive oil at the farming and industrial phases were estimated for both scenarios by following the Life Cycle Assessment (LCA) methodology under a “cradle-to-gate” approach. The gasification technology applied to the olive oil industry is able to manage all the pomace from the oil extraction process on site, avoiding transportation to pomace oil extraction plants. The proposed gasification plant generates 0.88 kWh of renewable electricity per kg of olive oil and enough heat to abandon the current practice of burning a significant part of the olive pit production. As a result, the alternative scenario contributes to a 8.25% reduction in the normalized environmental impact of olive oil production. In terms of climate change, the environmental impact of the functional unit is reduced from 2.21 to 1.74 kg CO₂ eq. (−21%) and the industrial phase becomes a major carbon sink with −0.51 kg of CO₂ eq. per kg of olive oil. In this regard, the integrated gasification plant is viewed as an attractive option for most olive oil mills to invest in sustainability through waste management and recovery.

1. Introduction

Olive oil production is an ancient practice that shapes the social, economic and environmental activity of many areas surrounding the Mediterranean basin. As a result of the outstanding nutritional properties of olive oil for human consumption, this economic activity is a source of wealth and employment. Despite the numerous benefits of olive oil production, a series of environmental impacts (EIs) are associated to the olive oil value chain. Over the last decades, a growing number of studies are focusing on life cycle assessment (LCA) applied to the olive oil industry. Many LCA studies in the olive grove have taken place in Italy [1–7] or Greece [8,9], and only a few have provided information about LCA in Spain [10–15]. In particular, Fernández-Lobato et al. [10] performed an LCA of an extensive area of tree crops and different olive oil mills in Andalusia, the largest virgin olive oil producing region within Spain. They developed an inventory for the farming and industrial phases over the period 2015–2020, which can be useful as an average reference for a comparative analysis between different harvests.

There are plenty of studies on LCA applied to the olive oil sector in the scientific literature. However, most of them are focused on the agricultural phase of olive oil production. Only a limited number of scientific publications deal with assessing the environmental performance of biomass conversion technologies applied to the value chain of virgin olive oils (VOOs). Among the different thermochemical conversion processes, biomass gasification is regarded as one of the best available technologies for simultaneous generation of electricity and heat (cogeneration) from by-products of the olive oil supply chain [16–21], since this technology at the same time reduces the amount of undesirable by-products from olive oil production. In gasification processes, a carbonaceous solid fuel such as olive pomace is partially oxidized and converted into a gaseous fuel, typically termed as producer gas or synthesis gas (syngas) [22]. The high-carbon feedstock requires a gasifying agent (air, pure oxygen and/or steam) in order to be gasified as a result of a series of chemical reactions requiring heat (endothermic) and releasing heat (exothermic). Gasification with air as gasifying agent is usually performed under autothermal conditions, which means that the exothermic combustion reactions release enough

* Corresponding author.

E-mail addresses: lflobato@ujaen.es (L. Fernández-Lobato), ramolina@ujaen.es (R. Aguado), fjurado@ujaen.es (F. Jurado), dvera@ujaen.es (D. Vera).

CAPÍTULO 6. MAIN RESULTS AND INTEGRATED DISCUSSION, CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

6.1. MAIN RESULTS AND INTEGRATED DISCUSSION

This section shows the main results obtained in the published scientific articles with an integrated discussion of them. In order to give clarity to the main findings, they have been summarized for a global understanding. *Anexos A1* and *A2* show the general results of environmental impact obtained in the referred papers.

Anexo A1 reflects the environmental impact of olive oil production through different agricultural systems, and the most representative in industrial stage (2 phases) for Spain, as well as the most representative of Tunisia, where there is more variety, in general.

Anexo A2 shows the results of the different scenarios proposed in articles 2 (the most representative production chain in Spain), 4 (the most representative production chain in Tunisia) and 5 (scenarios with conventional biomass treatment in the plant or through gasification in olive oil mill, as proposed in the aforementioned article).

It is observed in Fig. 6.1, how among the most representative farming systems in Spain, those of extensive farming, have less impact for climate change, one of the most relevant impact categories. In addition, it is observed that the industrial phase has a much lower impact than the agricultural phase.

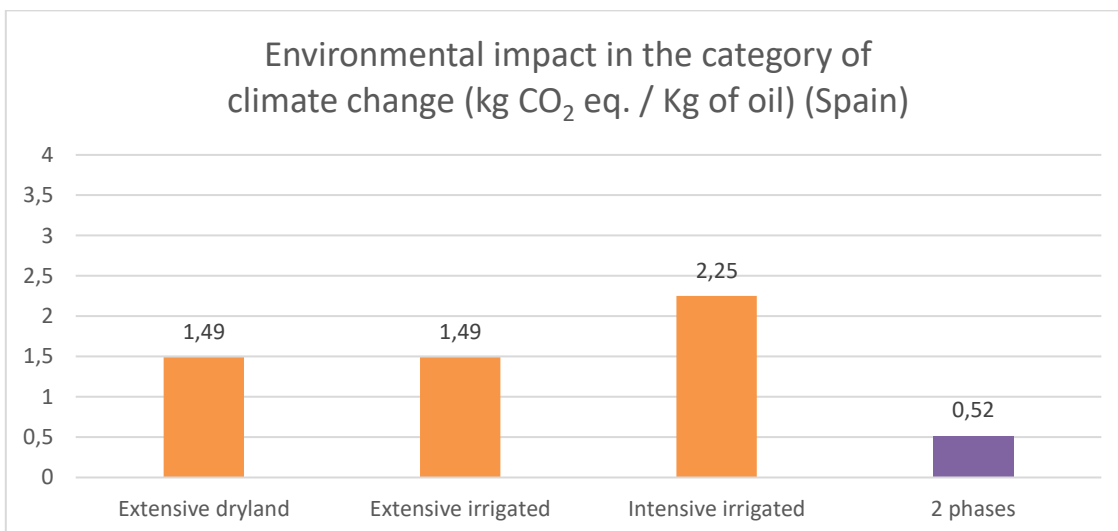


Fig. 6.1. Environmental impact on climate change in Spain (capítulo 3).

In addition to that, Fig. 6.2 shows the impact for Tunisia in this same category of impact, with the irrigated super-intensive type, being the least impactful among those studied, while the most generalized (extensive rainfed) produces a higher impact, but without the high repercussion of the great need for water required by irrigation systems. It is also observed that the impact of the industrial phase (3 phases) is lower than in the 2 phases

case. However, the 3 phases systems are associated with a large production of vegetable water, a forbidden scenario in Spain due to the difficulties on their treatment.

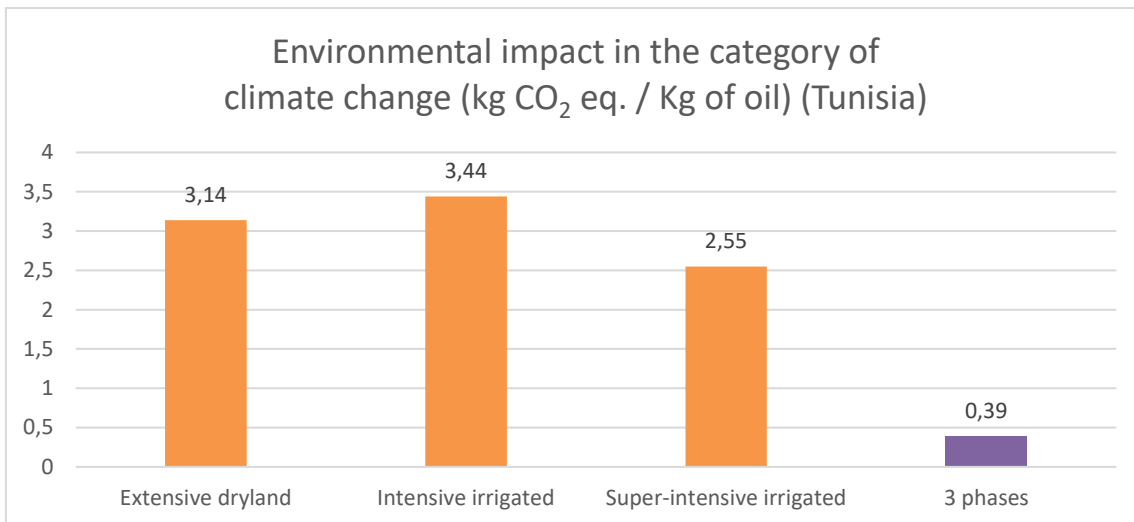


Fig. 6.2. Environmental impact on climate change in Tunisia (capítulo 4).

Fig. 6.3 shows how the Spanish productive chain has less impact in climate change category than that of Tunisia (two columns at left). On the other hand, considering also the treatment of biomass to generate energy in the industrial phase (two columns at right), gasification would reduce the environmental impact significantly in most categories, as shown for the climate change category as the most relevant.

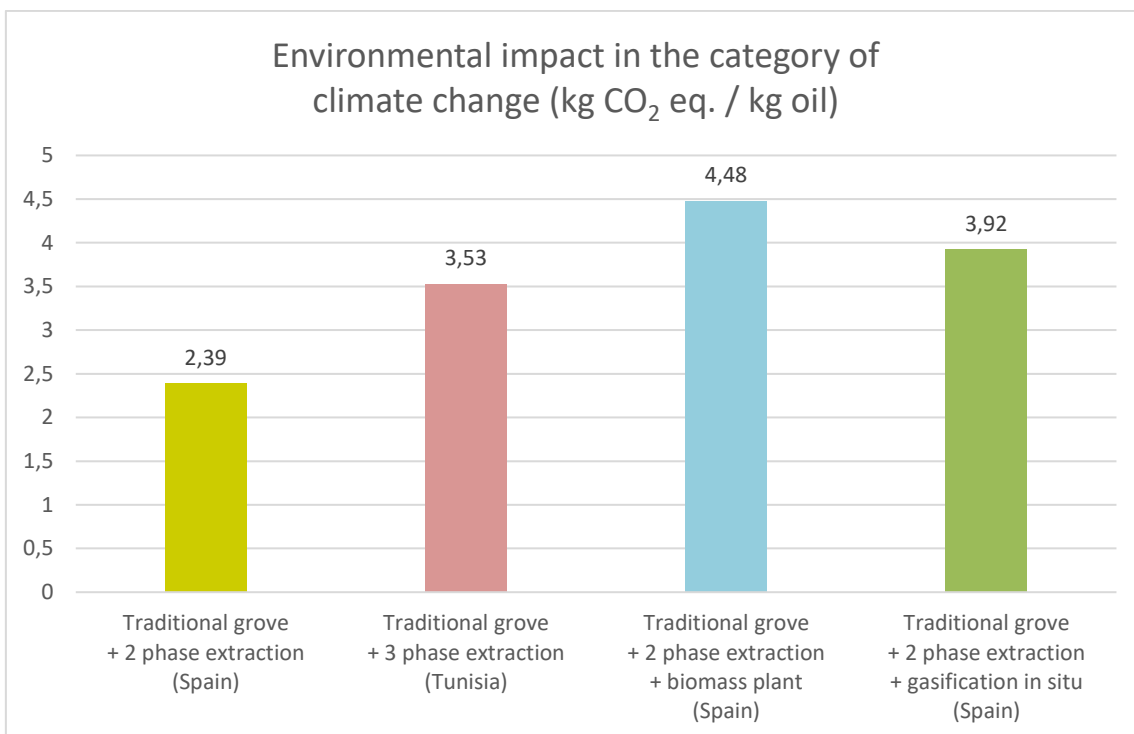


Fig. 6.3. Environmental impact on climate change by scenarios (capítulos 2,4 and 5).

6.2. CONCLUSIONS

This research work analyzes the environmental impact in different categories and scenarios of olive oil production and proposes a new approach to integrate a gasification plant that improves energy efficiency and reduces the environmental footprint. Initially, a study has been developed to establish what level of impact have the different production practices of virgin olive oil in Spain (*capítulos 2 and 3*). The study has also been carried out “*in situ*” (through a research stay in *l’Institut de l’Olivier* of Tunisia to characterize the environmental impact generated by the production of olive oil in that country, in their most representative agricultural and industrial systems (chapter 4). Chapter 5 has developed more specifically the gasification project, which is aimed at the combined generation of heat, electricity and biochar from the 2-phase olive pomace produced in Spanish oil mills.

The main conclusions of the study are the following:

- I. The main differences in cultivation methods reflect higher tree density, olive consumption and yield in the case of Spain, and more land use in the case of Tunisia.
- II. The cultivation phase is the main responsible for environmental impact in all cases, being responsible for most of the differences between the values of the countries and scenarios studied.
- III. Consequently, the environmental impact values in the industrial phase are in the same order of values for most of the scenarios except for the one that incorporates gasification, which turns the oil mill into a carbon sink. For the climate change category, the values are highly influenced by the pomace treated in the 2 and 3-phase systems.
- IV. Electricity consumption in the industrial phase generally contributed between 20 and 60% of the impacts, therefore renewable energy sources should be encouraged in operations.
- V. The C footprint and the C balance in the production of virgin olive oil are negative, with olive groves being efficient sinks of atmospheric CO₂ due to the fixation of CO₂ in permanent and non-permanent tree structures. The C footprint (per kg of olive oil) was significantly more negative for the traditional dryland, highlighting the greater contribution of this system to the mitigation of greenhouse gases.

- VI. The environmental impact of the most representative value chain in Tunisia is, on average, the most impactful of the countries studied in most categories. However, its value chain does not have a negative impact on the depletion of water resources because it is based on rainfed farming systems.
- VII. Those responsible for most of the environmental impact in the agricultural phase are fertilizers and phytosanitary products in Spain and the low yield of olives and soil management in Tunisia.
- VIII. The gasification technology applied to the olive oil industry is capable of managing in situ all the 2-phase pomace from the oil extraction process, avoiding its transport to the pomace oil extraction plants.
- IX. The proposed gasification plant generates about 0.85 kWh of renewable electricity per kg of olive oil in Spain, and enough heat to end the common practice of burning a significant part of the biomass generated in olive oil extraction.
- X. The results of the LCA show that the integrated gasification plant represents a reduction of 8.25% in the normalized environmental impact of olive oil production with respect to the reference scenario that represents the current situation in most Spanish oil mills, the most representative value chain worldwide.
- XI. In terms of climate change, considering fossil emissions, the installation of a gasification plant in oil mills would reduce the impact in Spain by 21.25%, turning the oil mills into carbon sinks (with a value of -0.51 kg of CO₂ eq . per kg of olive oil), in a similar way to what happens in the agricultural phase.

6.3. FUTURE WORK

The results obtained in the research are relevant and useful at decision-making level to develop the different systems studied and proposed. These results have made possible to validate the hypotheses proposed and reach the objectives established in this research. Likewise, this doctoral thesis has laid a way to deepen future research lines, proposing the ones described below.

It would be very important to analyze the different forms of olive cultivation and their differences in the generation and management of waste in Spain and other

representative countries. Improvements in terms of environmental impact could be achieved through enrichment of soil and water conservation practices, including but not limited to: a) Decreasing soil tillage between trees, b) Conservative practices of water management, c) Contribution of organic fertilizers, generated by composting and/or by adding pruning wood into the soil, and d) Make greater efforts in terms of energy efficiency and productivity in the agricultural phase to maximize production using the minimum cultivation areas in a sustainable way.

In the industrial phase, the most relevant issues to have in account are energy consumption and by-products management. Some of the most promising solutions could be: a) Supporting renewable energy sources in oil mills, such as photovoltaic systems or them based on biomass consumption b) Explore innovative technologies that can improve energy efficiency and the recovery of by-products, such as different systems based on pyrolysis, gasification (one of the best available technologies for bioenergy production) or solar evaporation, among others.

ANEXOS

ANEXO A1. RESULTADOS GENERALES DE IMPACTO AMBIENTAL POR SISTEMA

A1. Análisis comparativo del impacto ambiental, por país, fase y sistema, para 1 kg de aceite de oliva virgen (capítulos 3 y 4).

País (capítulo de tesis)	España (3)				Túnez (4)					
Fase	Agraria			Industrial	Agraria			Industrial		
Sistema	Extensivo secano	Extensivo regadío	Intensivo regadío	2 fases	Extensivo secano	Intensivo regadío	Super- intensivo	3 fases	2/3 fases combinadas	Prensa
Cambio climático (kg CO ₂ eq.) (con C biogénico)	1.49	1.49	2.25	0.52	3.14	3.44	2.55	0.39	0.36	0.23
Agotamiento del ozono (kg CFC-11 eq.)	9.5E-8	1,32E-8	1.89E-7	1.37E-8	4.39E-7	2.31E-7	1.59E-7	1.16E-8	1.00E-8	9.83E-9
Toxicidad humana, efectos no cancerígenos (CTUh)	6.87E-7	7.43E-7	1.35E-6	6,81E-8	2.57E-6	1.16E-6	9.90E-7	5.21E-8	4,96·10-8	1.72E-8
Toxicidad humana, efectos cancerígenos (CTUh)	4.87E-8	7.61E-8	1.11E-7	1.49E-8	2.50E-7	1.44E-7	9.45E-8	9.96E-9	6.22E-9	4.65E-9
Partículas en suspensión (kg PM2.5 eq.)	1.25E-3	1.32E-3	1.76E-3	7.87E-5	4.37E-3	2.38E-3	1.86E-3	5.34E-5	4.39E-5	3.70E-5
Radiación ionizante HH (kBq U235 eq.)	7.14E-2	2.67E-1	3,52E-1	4,90E-2	0.22	0.22	0.17	3.78E-3	3.16E-3	2.60E-3
Radiación ionizante E (interina) (CTUe)	4.63E-7	9.07E-7	1.21E-6	1.84E-7	1.21E-6	1.34 E-6	1.39E-6	1.88E-8	1.58E-8	1.32E-8
Formación de ozono fotoquímico (kg NMVOC eq.)	7.10E-3	6.45E-3	8.30E-3	6.13E-3	3.01E-2	1.21E-2	7.97E-3	5.43E-3	3.74E-3	5.02E-3
Acidificación (molc H+ eq.)	8.96E-3	1.09E-2	1.52E-2	8,94E-4	2.70E-2	1.88E-2	1.33E-2	8.81E-4	7.65E-4	5.78E-4
Eutrofización terrestre (molc N eq.)	4.23E-2	3.77E-2	4.84E-2	2.03E-3	0.12	0.06	0.04	3.44E-3	3.03E-3	2.24E-3
Eutrofización de agua dulce (kg P eq.)	2.85E-4	5.66E-4	8.42E-4	4,38E-5	6.65E-4	8.71E-4	5.17E-4	1.75E-5	1.33E-5	1.11E-5
Eutrofización marina (kg N eq.)	2.79E-3	2.62E-3	3.36E-3	2.05E-4	9.91E-3	5.11E-3	3.47E-3	1.33E-4	1.17E-4	1.20E-4
Ecotoxicidad en agua dulce (CTUe)	27.9	35.1	51.9	2.32	21.7	81.3	73.0	1.86	1.56	1.56
Uso de tierra (déficit de kg C)	55.4	38.1	46.1	0.67	411	40.3	27.9	0.57	0.37	0.3
Agotamiento de recursos hídricos (m3 eq. de agua)	8.79E-4	1.15E-1	1.28E-1	-8.03E-4	-0.02	0.31	0.22	-8.81E-4	-8.70E-4	9,13E-4
Recursos minerales, fósiles y renovables (kg Sb eq.)	1.51E-4	1.41E-4	2.29E-4	4,69E-5	3.70E-4	3.70E-4	2.20E-4	2.39E-5	1.20E-5	6,17E-6

ANEXO A2. RESULTADOS GENERALES DE IMPACTO AMBIENTAL POR ESCENARIO

A2. Análisis comparativo del impacto ambiental de las fases agraria e industrial conjuntamente, y también con tratamiento de la biomasa, para 1 kg de aceite de oliva virgen (capítulos 2,4 y 5).

País (capítulo de tesis)	España (2)	Túnez (4)	España (5)	
Fases	Agraria e industrial		Con tratamiento de biomasa	
Sistema	Tradicional + 2 fases	Extensivo secano + 3 fases	Tradicional	Con gasificación
Cambio climático (kg CO ₂ eq.) (with biogenic C)	2.39	3.53	4.48	3.92
Agotamiento del ozono (kg CFC-11 eq.)	1.78E-7	4.51E-7	2.07E-7	1.86E-7
Toxicidad humana, efectos no cancerígenos (CTUh)	1.06E-6	2.62E-6	9.76E-7	9.24E-7
Toxicidad humana, efectos cancerígenos (CTUh)	1.02E-7	2.60E-7	8.42E-8	7.32E-8
Partículas en suspensión (kg PM _{2.5} eq.)	1.65E-3	4.42E-3	1.76E-3	1.64E-3
Radiación ionizante HH (kBq U235 eq.)	2.48E-1	2.24E-1	2.46E-1	1.94E-1
Radiación ionizante E (interina) (CTUe)	1.05E-6	1.23E-6	1.05E-6	1.05E-6
Formación de ozono fotoquímico (kg NMVOC eq.)	1.55E-2	3.55E-2	4.90E-2	9.83E-3
Acidificación (molc H ⁺ eq.)	1.36E-2	2.79E-2	1.54E-2	1.39E-2
Eutrofización terrestre (molc N eq.)	5.15E-2	1.23E-1	6.16E-2	5.90E-2
Eutrofización de agua dulce (kg P eq.)	5.74E-4	6.83E-4	4.17E-4	3.70E-4
Eutrofización marina (kg N eq.)	3.71E-3	1.00E-2	4.18E-3	3.97E-3
Ecotoxicidad en agua dulce (CTUe)	3.28E+1	23.56	147	144
Uso de tierra (déficit de kg C)	4.86E+1	411.57	57.9	57.3
Agotamiento de recursos hídricos (m ³ eq. de agua)	5.29E02	-2.09E-2	6.04E-2	5.92E-2
Recursos minerales, fósiles y renovables (kg Sb eq.)	2.43E-4	3.94E-4	2.75E-4	2.54E-4

CURRICULUM VITAE

DATOS PERSONALES

Nombre: Lázuli Fernández Lobato

Fecha de nacimiento: 31 de enero de 1987

TÍTULOS ACADÉMICOS

- Arquitecto por la Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Arquitectura (septiembre de 2014).
- Máster oficial en Innovación en Arquitectura, Tecnología y Diseño por la Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Arquitectura (marzo de 2016).
- Graduado en Ingeniería Civil por la Universidad de Jaén. Escuela Politécnica Superior de Linares (marzo de 2021).
- Estudios en Grado en Ingeniería de Tecnologías Mineras por la Universidad de Jaén. Escuela Politécnica Superior de Linares (falta por superar el Trabajo de Fin de Grado).

ARTÍCULOS CIENTÍFICOS EN *JOURNAL CITATION REPORTS (JCR)*

- **Fernández-Lobato, L.**, Aguado, R., Jurado, F., Vera, D., 2022. Biomass gasification as a key technology to reduce the environmental impact of virgin olive oil production: A Life Cycle Assessment approach. *Biomass and Bioenergy (Agricultural engineering, Q1 in 2021)* 165, 106585. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2022.106585>
- **Fernández-Lobato, L.**, López-Sánchez, Y., Bacchar, R., Fendri, M., Vera, D., 2022. Life cycle assessment of the most representative virgin olive oil production systems in Tunisia. *Sustain. Prod. Consum. (Environmental studies, Q1 in 2021)* 32, 908–923. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2022.06.002>
- **Fernández-Lobato, L.**, García Ruiz, R., Jurado, F., Vera, D., 2021. Life cycle assessment, C footprint and carbon balance of virgin olive oils production from traditional and intensive olive groves in southern Spain. *J. Environ. Manage. (Environmental sciences, Q1 in 2021)* 293, 112951. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.112951>
- **Fernández-Lobato, L.**, López-Sánchez, Y., Blejman, G., Jurado, F., Moyano-Fuentes, J., Vera, D., 2021. Life Cycle Assessment of the Spanish virgin olive oil production: a case study for Andalusian region. *J. Clean. Prod. (Engineering, environmental, Q1 in 2021)* 290, 125677. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125677>

CONFERENCIAS INTERNACIONALES

- **Fernández-Lobato, L.**, Aguado, R., Jurado F., Almonacid B., Beltrán G., Vera D., “Economía circular en la industria oleícola: gasificación aplicada a la valorización de alperujo”. XX Simposio Científico-Técnico de EXPOLIVA 2021.
- **Fernández-Lobato, L.**, Guido-Toledo, J. L., Fendri, M., Vera, D., “Opportunities for olive oil value chain enhancement through the by-products valorisation: A life cycle assessment in the Andalusian region (Spain). LCA Food 2020.
- Donaire Ávila, J., Escobedo Ruiz, A., **Fernández Lobato, L.** “Trabajos fin de grado colaborativos en metodología BIM: aplicación a un caso concreto en la EPS Linares (Universidad de Jaén)”, Innovación Docente e Investigación En Ciencias, Ingeniería y Arquitectura, 2019.
- **Fernández-Lobato, L.** “Análisis del Ciclo de Vida de los materiales de construcción mediante tecnología BIM en viviendas sostenibles”. I Jornadas Jóvenes Científicos en Materiales de Construcción, 2018.

CAPÍTULOS DE LIBRO INTERNACIONALES

- Donaire Ávila, J., Escobedo Ruiz, A., **Fernández Lobato, L.**, 2019. Colaboración entre titulaciones de ingeniería para la realización de proyectos en metodología BIM, in: Innovación Docente e Investigación En Ciencias, Ingeniería y Arquitectura. pp. 683–699.

CAPÍTULOS DE LIBRO NACIONALES

- **Fernández-Lobato, L.** 2022. Turismo arquitectónico, en Pulido, J.I. (dir.) (2022): Tipologías de interés especial en turismo de interior. Ediciones PIRÁMIDE. pp. 93–112.
- **Fernández-Lobato, L.** 2021. Turismo arquitectónico, en Pulido, J.I. (dir.) (2021): Identificación, caracterización y análisis del potencial de las tipologías de interés especial de turismo de interior. Cátedra de Turismo de Interior de la Universidad de Jaén. Jaén. pp. 35.

ESTANCIAS DE INVESTIGACIÓN INTERNACIONALES

- Estancia de investigación internacional de 3 meses en Institut de l'Olivier (Túnez) del 16 de agosto de 2021 hasta el 16 de noviembre de 2021.
- Estancia de investigación internacional de 6 semanas en University of Nis (Serbia) del 1 de septiembre de 2013 hasta el 15 de octubre de 2013.

PARTICIPACIÓN EN PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN

- Contrato de investigación en proyecto nacional EN-OLIVE, a través de la Universidad de Jaén, desde el 21 de septiembre de 2022 hasta la actualidad.
- Contrato de investigación en proyecto internacional OLIVEN, a través de la Universidad de Jaén, desde el 14 de septiembre de 2019 hasta el 2 de septiembre de 2021.
- Participación en el proyecto internacional AURA 3.0 y 3.1, a través de la Universidad de Sevilla, durante el curso 2017/2018.
- Participación en el proyecto internacional AURA 2.0, a través de la Universidad de Sevilla, durante el curso 2016/2017.
- Participación en el proyecto internacional AURA: Vivienda social para clima tropical, a través de la Universidad de Sevilla, durante el curso 2015/2016.

