



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

TESIS DOCTORAL

**APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DEL
CICLO DE VIDA EN EL ESTUDIO
AMBIENTAL DE MATERIALES DE
CONSTRUCCIÓN**

**PRESENTADA POR:
MANUEL UCEDA RODRÍGUEZ**

**DIRIGIDA POR:
CARMEN MARTÍNEZ GARCÍA
MARÍA TERESA COTES PALOMINO**

JAÉN, MARZO DE 2023



Universidad de Jaén

RESUMEN RAZONADO DE LAS DIRECTORAS DE TESIS

La Tesis presentada por D. Manuel Uceda Rodríguez se enmarca dentro de dos líneas de investigación como son la Valorización de Residuos y la Economía Circular que han sido desarrolladas mediante los Proyectos MAT2015-70034-R. SMARTMATS: Smart materials for sustainable construction y PID2019-109520RB-I00. ECO-MET-AL: ¿Pueden los residuos metálicos industriales y mineros producir áridos ligeros sostenibles? Aplicando la Economía Circular del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Y el proyecto CTM2016-75977-R. de Implementación de una alternativa sostenible para la gestión integral del alpeorujo, un residuo contaminante de la industria oleícola del Ministerio de Economía y Competitividad.

Durante dichos proyectos se han establecido desde un punto de vista científico y tecnológico las bases teóricas y los procedimientos experimentales para el desarrollo de nuevos materiales a partir de materias primas secundarias. Incluyendo la evaluación de la sostenibilidad que supondría la fabricación de una serie de productos cerámicos innovadores para el sector de la construcción y la cuantificación de la mejora en términos ambientales. En esta Tesis se ha realizado una evaluación comparativa a través de la metodología de análisis de ciclo de vida con sus contrapartidas de los sistemas tradicionales: ladrillos y áridos ligeros artificiales. Este aspecto resulta fundamental teniendo en cuenta la alta ineficiencia energética del proceso de fabricación cerámico.

La presente propuesta de investigación supone una contribución a la implantación de la Economía Circular en el ámbito de la ingeniería de materiales. Entendiéndola como un enfoque económico y ambiental que busca maximizar el uso de los recursos naturales mediante el diseño producción consumo y gestión de los residuos de manera sostenible. En este sentido, el plan de trabajo llevado a cabo en la presente Tesis abarca de forma prioritaria el estudio de los siguientes residuos: alpeorujo, cáscaras de frutos secos, lodos de depuración de papel moneda, polvo de corcho, posos de café y lana mineral. En la Tesis se han procesado los datos con el programa SimaPro, y se ha calculado el impacto ambiental siguiendo la metodología CML 2000. Las pautas que se han seguido son coherentes con las directrices que proporciona el estándar ISO 14040. La Tesis Doctoral

se divide en seis capítulos y cinco anexos: el primer capítulo presenta una introducción, en el segundo capítulo se ha llevado a cabo un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) utilizando el software SimaPro en relación con la fabricación de áridos ligeros artificiales (LWA). El estudio pretende evaluar los cambios en el impacto ambiental cuando se añade un aditivo de origen residual, concretamente orujo de oliva (OP), siguiendo los principios de la Economía Circular. Los resultados óptimos de adición se sitúan en el intervalo de 1,25 y 2,5% en peso de OP. De este modo, se favorecería la reducción de las emisiones asociadas a la fabricación de LWA sin afectar negativamente a las propiedades tecnológicas del material resultante. En el tercer capítulo se realiza un estudio comparativo de ACV entre el proceso de fabricación de ladrillo cerámico tradicional y el proceso de fabricación de ladrillo cerámico incorporando alperujo es un paso ineludible para lograr la integración de la circularidad y la ecoinnovación en el sistema de producción de materiales cerámicos tradicionales, a través de la metodología CML (Centrum voor Milieukunde Leiden) e IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change). Los resultados obtenidos sugieren que los beneficios medioambientales de esta práctica son muy limitados, incluso teniendo en cuenta la contribución de diferentes cantidades de estos residuos a la producción de ladrillos. En el capítulo cuatro se realizó una evaluación comparativa del ciclo de vida de los áridos ligeros artificiales (LWAs) para un total de cinco escenarios diferentes: LWA obtenidos de forma tradicional, es decir, utilizando exclusivamente arcilla en su fabricación (arcilla rubia española, arcilla roja portuguesa y arcilla rubia portuguesa), y LWA fabricados con cuatro residuos diferentes, con una sustitución parcial del 2,5% para cada una de las arcillas por residuo (cáscaras de almendra y avellana, lodos de depuración de papel moneda, polvo de corcho y posos de café). Los resultados obtenidos en esta investigación permiten concluir que la adición de residuos orgánicos mostró un comportamiento ambiental ligeramente superior al sistema convencional, siendo las LWA fabricadas con cáscara de almendra y avellana la opción más respetuosa con el medio ambiente, con reducciones superiores al 30% en algunos casos, seguidas de las LWA fabricadas con posos de café. En cambio, la adición de lodos de depuradora de papel y de polvo de corcho representa una optimización medioambiental mínima. En el capítulo 5 se investiga por primera vez el uso de lana de vidrio (GW) y lana de roca (RW) como componente en la fabricación de áridos ligeros, demostrando que ambas pueden ser materias primas adecuadas teniendo en cuenta la densidad (1,3-1,5 g/cm³) y la resistencia mecánica (2-6 MPa) obtenidas. Además, el uso de GW ayudaría a reducir significativamente la temperatura de sinterización (700 °C) respecto a la utilizada normalmente en la fabricación de estos materiales (alrededor de 1200 °C), lo que implicaría un importante ahorro energético. Además, se ha observado una mejora ambiental significativa en casi todas las categorías de impacto analizadas de los áridos artificiales fabricados con lana mineral respecto a los

LWA tradicionales. Por último, en el capítulo 6 se recogen las conclusiones del ACV realizado que examina el sistema de producción de ladrillos y áridos ligeros artificiales que incorporan residuos industriales desde la cuna hasta la puerta y los compara a su vez con productos fabricados de forma tradicional carentes de aditivos.

En definitiva, la presente Tesis tiene como principal objetivo realizar un estudio comparativo del Análisis de Ciclo de Vida de materiales de construcción tradicionales y fabricados a partir de residuos, que permita determinar el impacto global del CV de los diferentes productos evaluados. Toda esta visión se encuentra enfocada al nuevo paradigma de la Economía Circular.

Finalmente, hay que resaltar que esta investigación ha dado lugar a una producción científica relevante, destacando las siguientes cuatro publicaciones en revistas de impacto (Q1/Q2) dentro del área de ingeniería de materiales e ingeniería ambiental la ingeniería medioambiental, y que constituyen los capítulos de resultados discutidos en la presente Tesis:

- **Uceda-Rodríguez, M.**, López-García, A. B., Moreno-Maroto, J. M., Cobo-Ceacero, C. J., Cotes-Palomino, M. T., & Martínez García, C. (2020). *Evaluation of the environmental benefits associated with the addition of olive pomace in the manufacture of lightweight aggregates*. *Materials*, 13(10), 2351. DOI: 10.3390/ma13102351.
- **Uceda-Rodríguez, M.**, Moreno-Maroto, J. M., Cobo-Ceacero, C. J., López-García, A. B., Cotes-Palomino, T., & Martínez-García, C. (2022). *Comparative Life Cycle Assessment of lightweight Aggregates Made from Waste—Applying the Circular Economy*. *Applied Sciences*, 12(4), 1917. DOI: 10.3390/app12041917.
- López-García, A. B., Cotes-Palomino, T., **Uceda-Rodríguez, M.**, Moreno-Maroto, J. M., Cobo-Ceacero, C. J., Andreola, N. M., & Martínez-García, C. (2021). *Application of Life Cycle Assessment in the Environmental Study of Sustainable Ceramic Bricks Made with 'alperujo' (Olive Pomace)*. *Applied Sciences*, 11(5), 2278. DOI: 10.3390/app11052278.
- López-García, A. B., **Uceda-Rodríguez, M.**, Leon-Gutierrez, S., Cobo-Ceacero, C. J. & Moreno-Maroto, J. M. (2021). *Eco-efficient transformation of mineral wool wastes into lightweight aggregates at low firing temperature and associated environmental assessment*. *Construction and building materials*, 345, 128294. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128294.

Además, la investigación llevada a cabo también ha dado lugar a seis publicaciones adicionales, indexadas en el JCR y pertenecientes al primer y segundo cuartil (Anexo E), dos patentes (Anexo F) así como quince aportaciones a Congresos, once de ellas de carácter internacional. El desarrollo de estos estudios ha contado con la participación de investigadores externos a la Universidad de Jaén, en el que destacarían universidades nacionales como la Universidad de Granada o la Universidad de Castilla La Mancha, y colaboraciones internaciones con el Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari" de la Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia (Italia). Además, estas investigaciones se enmarcan dentro de proyectos financiados por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y fondos FEDER:

- **MAT2015-70034-R.** SMARTMATS: *Smart materials for sustainable construction.* Universidad de cabecera: UJA
- **CTM2016-75977-R.** *Implementación de una alternativa sostenible para la gestión integral del alpeorujo, un residuo contaminante de la industria oleícola.* Universidad de cabecera: UGR
- **PID2019-109520RB-I00.** ECO-MET-AL: *¿Pueden los residuos metálicos industriales y mineros producir áridos ligeros sostenibles? Aplicando la Economía Circular.* Universidad de cabecera: UJA

Por todo ello, se autoriza la presentación de la Tesis Doctoral " APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA EN EL ESTUDIO AMBIENTAL DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN", que consiste en un "conjunto de trabajos publicados" (según Artículo 25 del Reglamento de los Estudios de Doctorado de la Universidad de Jaén) y cubre de forma completa los objetivos establecidos de mostrar una alternativa sostenible al sector de la cerámica y de la edificación, que mejoren la viabilidad y la optimización de procesos de cara a su valorización.

Linares, 5 de mayo de 2023

Firma de las Directoras:

MARTINEZ
GARCIA CARMEN
- 26217339F

Firmado digitalmente
por MARTINEZ GARCIA
CARMEN - 26217339F
Fecha: 2023.05.05
10:48:10 +02'00'

Dra. Carmen Martínez García

COTES
PALOMINO
MARIA TERESA
- 26208114M

Firmado digitalmente
por COTES PALOMINO
MARIA TERESA -
26208114M
Fecha: 2023.05.07
10:40:18 +02'00'

Dra. María Teresa Cotes Palomino

AGRADECIMIENTOS

El final de un camino siempre es un lugar privilegiado donde echar la vista atrás para evaluar el avance lento, pero constante, que no permite observarse en el día a día. Es un orgullo poder apreciar que todo ese esfuerzo, dedicación y tiempo que invertimos queda reflejado en nuestro trabajo y hacen que aquella lejana idea se convierta en un hecho. La pasión, el esmero y la paciencia son características intangibles que un ávido lector logra apreciar entre las páginas de un libro. Por supuesto, esta es la teoría que no siempre consigue aplicarse, aunque eso no significa que se haga el mayor de tus esfuerzos por alcanzar ese ideal tan alto. La historia es testigo de cómo la sociedad necesita apoyarse los unos en los otros para avanzar fuertes y seguros hacia delante. Y es por este motivo, que las páginas que suceden, están embebidas de ese espíritu, así como de la constancia y esfuerzo de muchas personas que han trabajado, algunas incluso sin saberlo, en que haya sido posible.

En primer lugar, la familia, esa conexión vital y primaria con el mundo. Este trabajo se lo agradezco y dedico a mi madre, por ser el pilar que siempre ha sustentado mi galaxia exterior e interior. Además, su ejemplo de esfuerzo y dedicación en todo lo que hace ha sido una inspiración para mí. También quiero reconocer el papel de mi hermana y mi tía Merches, quienes siempre han sido referentes en cuanto a la formación académica universitaria para lograr tus aspiraciones. Y a mis abuelos, por ser los responsables directos de que todo esto sea una realidad.

Por supuesto, en segundo lugar, a las personas que forman parte de mi círculo académico y profesional con quienes comparto la autoría de mi trabajo. A mis tutoras, directoras, jefas y profesoras, Carmen y Teresa, que, con su dedicación, empeño y tesón, me han inculcado un conocimiento mucho más amplio que el contenido en sus asignaturas. A Paco, el saber personificado, por esas clases improvisadas donde aprender y descubrir iban de la mano para encontrarse con la curiosidad. A mis compañeros, y profesores en alguna ocasión, Ana Belén y José Manuel, por su capacidad y visión que me sirvió de guía. A Carlos, Fran, Luisa y todas aquellas personas que han formado parte de mi día a día en el laboratorio durante los años en los que se enmarcan el doctorado y los previos también.

No podían faltar en estas líneas a mis amigos, el apoyo moral necesario en la vida y que te recargan la energía para continuar y seguir recorriendo el camino que te lleva hasta la meta. Resulta imposible que no aparezcan nombres como los de mis Lauras, mis Carlos, Anyul, o recientes incorporaciones como Mauro y Jose, sin olvidar a mis amigos catalanes, gallegos y demás sitios de la península, que en tan poco tiempo han influido tanto en mi vida y en mi historia.

Y te agradezco también a ti, futuro lector, que puedas encontrar, al menos un poco, esa pasión y esfuerzo que he querido inculcar entre estas páginas.

LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

Con el objetivo de facilitar la comprensión de los artículos que componen esta tesis, se facilita un listado con las abreviaturas que se han empleado en los mismos:

A: Superficie sometida a carga (mm ²)	LL: Límite líquido
ACV/LCA: Análisis del Ciclo de Vida	L_{max}: Carga máxima registrada
AHS: Cáscaras de almendra y avellana	LOD: Pérdida de peso por secado en estufa
A_{imm}: Superficie bruta sumergida (mm ²)	LOI: Pérdida por ignición
ALP: Alperujo	LOI_{firing}: Etapa de sinterización LOI
BC: Carbono negro	LOI_{preh}: Etapa de precalentamiento LOI
BI: Índice de Expansión	LWA: Árido ligero
CDW: Residuos de construcción y demolición	M: Lodos de corte de mármol
CE: Economía Circular	M_{dry}: Masa después del secado
CG: Posos de café	MH: Limo de alta compresibilidad
CH: Arcilla de alta compresibilidad	ML: Limo de baja compresibilidad
CKP: Polvo de corcho	M_{wet}: Masa después de inmersión durante un tiempo <i>t</i>
CL: Arcilla de baja compresibilidad	NCV: Poder calorífico neto
CML: Centrum voor Milieukunde Leiden	NuS: Cáscara de nuez
CP: Polvo de corcho	OA: Agregados orientados
D: Distancia entre los puntos de carga	OC: Carbono orgánico
d₅₀: Diámetro medio	OP: Alpeorajo
d_Δ: Diámetro del árido	Pc: Porosidad cerrada
XRD: difracción de rayos X	PI: Índice de plasticidad
DSC: Calorimetría diferencial de barrido	PL: Límite plástico
EDX: Rayos X de energía dispersiva	Po: Porosidad abierta
F: Carga de rotura	PR: Arcilla roja portuguesa
FE-SEM: Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo	PS: Lodos de depuradora de papel moneda
GCV: Poder caloríficos brutos	P_T: Porosidad total
GHG: Emisión de gases de efecto invernadero	PY: Arcilla rubia portuguesa
GWP: Potencial de calentamiento global	PY1: Arcilla rubia portuguesa 1
IB: Arcilla negra italiana	PY2: Arcilla rubia portuguesa 2
IC: Carbono inorgánico	R_{drying}: Contracción tras el secado en estufa
IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático	R_{firing}: Contracción tras sinterización
IR: Arcilla roja italiana	S: Resistencia a la compresión del árido
LCI: Inventario del Ciclo de Vida	SB: Arcilla negra española
LCIA: Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida	SR: Arcilla roja española
	Suc: Succión
	SW: Arcilla blanca española
	SY: Arcilla rubia española

T: Temperatura de sinterización

t: Tiempo

TC: Carbono total

t_{firing}: Tiempo de sinterización en el centro del horno

TG: Análisis termogravimétrico

T_{max}: Tenacidad máxima

t_{preh}: Tiempo de precalentamiento en la entrada del horno

WA₂₄: Absorción de agua tras 24 horas sumergido

W_{op}: Contenido óptimo de humedad

XRF: Fluorescencia de rayos X

ρ_a : Densidad aparente

ρ_b : Densidad aparente suelta

ρ_{rd} : Densidad seca en horno

ρ_{solid} : Densidad de la fase sólida

RESUMEN

Este estudio pretende evaluar la ventaja ambiental que supondría la fabricación de una serie de productos cerámicos innovadores para el sector de la construcción. Con el fin de cuantificar la mejora en términos ambientales, en este trabajo se realizó una evaluación comparativa a través de la metodología de análisis de ciclo de vida con sus contrapartidas de los sistemas tradicionales: ladrillos y áridos ligeros artificiales. Se ha empleado una amplia variedad de arcillas, de diferentes orígenes geográficos, y de mezclas que, partiendo de estas mismas arcillas, emplearon una serie de residuos agroindustriales y de la construcción valorizables a través de la Economía Circular como el alpeorujo, cáscaras de frutos secos, lodos de depuración de papel moneda, polvo de corcho, posos de café y lana mineral. La unidad funcional se fijó en la producción de un kilo de cada tipo de elemento constructivo. Los datos de partida correspondientes al material, energía y emisiones se obtuvieron de laboratorio y de bases de datos, como es el caso de Ecoinvent. Los datos fueron procesados con el programa SimaPro, y se calculó el impacto ambiental siguiendo la metodología CML 2000, un sistema de cálculo que ofrece una visión cuantitativa del impacto que supondría la producción de los áridos desde cuatro puntos de vista diferentes, como son la salud humana, el medioambiente, el entorno artificial y los recursos naturales. Las pautas que se han seguido se ajustan con las directrices que proporciona el estándar ISO 14040.

Se utilizó alpeorujo como sustituto de la arcilla en áridos y ladrillos en diferentes proporciones de peso: 1,25%, 2,5%, y 5% para los áridos, y 3%, 7%, y 10% para los ladrillos. Al incorporar alpeorujo en la mezcla, se estimó una mejora ambiental del 4-15% para las proporciones de 1,25%, 2,5%, y 5% en los áridos, y del 6-8% para los ladrillos, dependiendo de la cantidad utilizada. Los valores óptimos de adición se sitúan por debajo del 2,5% en peso. Los resultados obtenidos en esta investigación para el resto de residuos orgánicos permiten concluir que la adición de estos mostró un comportamiento ambiental ligeramente superior al material tradicional. Los áridos elaborados con cáscaras de frutos secos son la opción más respetuosa con el medio ambiente, ya que en algunos casos pueden reducir las emisiones en más de un 30%. Los áridos hechos con posos de café son la siguiente opción más favorable. En cambio, la adición de lodos de depuradora y de polvo de corcho representa una mejora ambiental mínima. Por otro lado, se ha observado una mejora ambiental significativa en casi todas las categorías de impacto analizadas de los áridos fabricados con lana mineral respecto a los tradicionales.

La valorización de residuos es uno de los elementos clave para mitigar los problemas medioambientales que amenazan a nuestra sociedad. La sustitución de materia prima por estos residuos, no solo reduciría el impacto que supondría la fase de extracción de esta o la eliminación del medio de los mismos, sino que favorecería la disminución de las emisiones asociadas a la fabricación de productos con alta demanda de energía. Todo ello sin afectar negativamente a las propiedades tecnológicas del material resultante.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the environmental advantage of manufacturing a series of innovative ceramic products for the construction sector. In order to quantify the improvement in environmental terms, in this work a comparative evaluation was carried out through the Life Cycle Assessment (LCA) methodology with its counterparts of traditional systems: bricks and artificial lightweight aggregates. A wide variety of clays, from different geographical origins, and mixtures that, starting from these same clays, used a series of agro-industrial and construction wastes that can be valorized through the Circular Economy, such as olive pomace, almond and hazelnut shells, sludge from the purification of paper money, cork dust, coffee grounds and insulating mineral wool. The functional unit was set at the production of one kilogram of each type of building element. The input data for material, energy and emissions were obtained from laboratory and database, such as Ecoinvent. In turn, the data were processed with the SimaPro program, and the environmental impact was calculated following the CML 2000 methodology, a calculation system that offers a quantitative view of the impact of aggregate production from four different points of view, such as human health, the environment, the artificial environment and natural resources. The guidelines that have been followed are in line with the guidelines provided by the ISO 14040 standard.

The olive pomace or alpeorujo was used as a substitute for clay in aggregates and bricks in different weight proportions: 1.25%, 2.5%, and 5% for aggregates, and 3%, 7%, and 10% for bricks. By incorporating alpeorujo in the mix, an environmental improvement of 4-15% was estimated for the proportions of 1.25%, 2.5%, and 5% in aggregates, and 6-8% for bricks, depending on the amount used. Optimum addition results are below 2.5% by weight of alpeorujo. The results obtained in this research for the rest of the organic wastes allow us to conclude that the addition of these showed a slightly better environmental performance than the traditional material. Aggregates made with nut shells are the most environmentally friendly option, since in some cases they can reduce emissions by more than 30%. Aggregates made from coffee grounds are the next most favorable option. In contrast, the addition of paper sewage sludge and cork dust represents a minimal environmental improvement. On the other hand, a significant environmental improvement has been observed in almost all the impact categories analyzed for artificial aggregates made with mineral wool compared to traditional LWA.

Waste valorization is one of the key elements to mitigate the environmental problems that threaten our society. The substitution of raw material by these wastes would not only reduce the impact of the extraction phase or the elimination of the waste from the environment, but would also reduce the emissions associated with the manufacture of energy-intensive products. All this without negatively affecting the technological properties of the resulting material.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Lista de abreviaturas y símbolos	ix
Resumen.....	xi
Abstract	xiii
Capítulo I	23
Introducción	25
1.1 Motivación general y alcance de este estudio	25
1.2 Economía Circular como motor del cambio.....	27
1.3 Introducción a los contenidos del estudio	29
1.4 Análisis de Ciclo de Vida	30
1.5 Metodología del ACV.....	33
1.6 Estado del arte científico-tecnológico del análisis de ciclo de vida	38
1.7 Herramientas informáticas de ACV	40
1.8 Estado del arte en la obtención de materiales sostenibles.....	44
Referencias	51
Capítulo II.....	67
Hipótesis, Objetivos y Estructura de la Tesis	69
2.1 Hipótesis de trabajo	69
2.2 Objetivos.....	69
2.3 Estructura de la Tesis.....	70
Capítulo III.....	75
Metodología Experimental.....	77
3.1 Materias primas principales: Arcilla	78
3.2 Materias primas secundarias: Residuos.....	84
3.3 Metodología aplicada	87
Capítulo IV	91
Evaluación de los beneficios medioambientales asociados a la adición de orujo de oliva en la fabricación de áridos ligeros.....	93
1. Introducción.....	93
2. Metodología	95
3. Resultados y discusión	100
4. Conclusiones	107
Contribución de los autores.....	108
Agradecimientos.....	108
Conflictos de intereses	108
Referencias.....	108
Capítulo V.....	111
Aplicación de la Evaluación del Ciclo de Vida en el Estudio Ambiental de Ladrillos Cerámicos Sostenibles fabricados con alperujo.....	113

1. Introducción.....	113
2. Metodología.....	114
3. Resultados y discusión.....	120
4. Conclusiones.....	127
Contribución de los autores	128
Agradecimientos	128
Conflictos de intereses.....	128
Referencias	129
Capítulo VI	131
Evaluación comparativa del ciclo de vida de los áridos ligeros fabricados a partir de residuos – Aplicación de la Economía Circular	133
1. Introducción.....	133
2. Metodología.....	137
3. Resultados y discusión.....	143
4. Conclusiones.....	149
Contribución de los autores	151
Agradecimientos	151
Conflictos de intereses.....	151
Referencias	151
Capítulo VII	157
Transformación ecoeficiente de residuos de lana mineral en áridos ligeros a baja temperatura de sinterización y evaluación medioambiental asociada	159
1. Introducción.....	159
2. Materiales y métodos	161
3. Resultados y discusión.....	165
4. Conclusiones.....	173
Declaración de intereses concurrentes.....	173
Agradecimientos	173
Referencias	174
Capítulo VIII	179
Conclusiones	181
ANEXOS.....	185
ANEXO A	187
Glosario de términos	189
ANEXO B.....	199
Etapas de ACV	201
ANEXO C	231
Bases de datos.....	233
ANEXO D	237
Categorías de impacto.....	239

ANEXO E	251
Artículos complementarios.....	253
ANEXO F	269
Patentes	271

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Marco técnico para el análisis del ciclo de vida.	33
Figura 2. Flujo principal de la definición del objetivo y alcance.	34
Figura 3. Partes principales del análisis de inventario.	34
Figura 4. Ejemplo de diagrama de flujo utilizado en la recopilación de datos.	35
Figura 5. Partes principales de la evaluación de impacto.	36
Figura 6. Partes principales de la interpretación de los resultados.	37
Figura 7. Número de publicaciones científicas sobre ACV desde 1980.	39
Figura 8. Número de publicaciones científicas sobre ACV de ladrillos y LWA.	40
Figura 9. Interfaz y metodologías europeas disponibles en SimaPro.	42
Figura 10. Reacciones en el proceso cerámico.	44
Figura 11. Número de publicaciones científicas sobre ladrillos sostenibles desde 1990.	46
Figura 12. Materia prima, usos y aplicaciones de los áridos.	48
Figura 13. Sección transversal de un árido ligero.	49
Figura 14. Representación esquemática de la secuencia de Fases de trabajo.	77
Figura 15. Arcilla Blanca Española.	78
Figura 16. TGA-DSC de la arcilla SW.	79
Figura 17. Arcilla Rubia Española.	80
Figura 18. TGA-DSC de la arcilla SY.	81
Figura 19. Arcilla Roja Portuguesa.	81
Figura 20. TGA-DSC de la arcilla PR.	82
Figura 21. Arcilla Rubia Portuguesa.	82
Figura 22. TGA-DSC de la arcilla PY.	83
Figura 23. Alpeorujó.	84
Figura 24. Cáscara de almendra y avellana.	85
Figura 25. Lodo de depuradora de papel.	85
Figura 26. Polvo de corcho.	86
Figura 27. Posos de café.	86
Figura 28. Lana mineral.	86
Figura 29. Categorías de impacto analizadas.	89
Figura 30. Elementos y procesos que contemplan cada uno de los pasos analizados.	96
Figura 31. Elementos y procesos para formar el LCI de cada etapa.	96
Figura 32. Contribución de los impactos de Caracterización asociados a 1 kg de áridos ligeros fabricados sin residuos de diferentes etapas de producción.	102
Figura 33. Caracterización. Comparación de los impactos obtenidos entre los áridos ligeros fabricados sin residuos y los fabricados con 2,5% en peso de OP (diferentes condiciones de sinterización).	104
Figura 34. Normalización. Valores obtenidos de diferentes categorías para todos los tipos de áridos ligeros estudiados.	105
Figura 35. Muestras antes (a) y después (b) de la sinterización.	115
Figura 36. Muestras sinterizadas a 850 °C; (a) 3% ALP; (b) 7% ALP; (c) 10% ALP.	116
Figura 37. Diagrama de flujo del ciclo de vida de los ladrillos tradicionales y de los ladrillos que incorporan orujo de oliva en los distintos escenarios considerados.	119
Figura 38. Potencial de calentamiento global, 100 años (kg CO ₂ eq).	120

Figura 39. Distribución de impactos para cada una de las etapas analizadas en la caracterización en ladrillos tradicionales.	121
Figura 40. Distribución de impactos para cada una de las etapas analizadas en la caracterización para ladrillos con orujo de oliva (a) ladrillos con 3% de ALP; (b) ladrillos con 7% de ALP; (c) ladrillos con 10% de ALP.	124
Figura 41. Categorías de impacto analizadas con la metodología CML.	125
Figura 42. Categorías de impacto analizadas utilizando la CML Normalizada.	125
Figura 43. Esquema de producción de áridos ligeros artificiales y límites del sistema considerados.	139
Figura 44. Escenarios del sistema considerados: (0) LWA de SY, PY y PR sin residuos; (1) LWA de SY, PY y PR con AHS; (2) LWA de SY, PY y PR con PS; (3) LWA de SY, PY y PR con CP; (4) LWA de SY, PY y PR con CG.	140
Figura 45. Contribución de los impactos caracterizados asociados a 1 kg de áridos ligeros fabricados sin residuos de diferentes etapas de producción (Escenario 0).	145
Figura 46. Comparación de los beneficios medioambientales de los impactos caracterizados entre los áridos ligeros producidos con un 2,5% en peso de residuos en los Escenarios 1 (a), 2 (b), 3 (c) y 4 (d) en la fase de EXTRACCIÓN.	146
Figura 47. Comparación de los beneficios medioambientales de los impactos caracterizados entre los áridos ligeros producidos con un 2,5% en peso de residuos en los Escenarios 1 (a), 2 (b), 3 (c) y 4 (d) en la fase de FABRICACIÓN.	147
Figura 48. Valores de impacto caracterizados de diferentes categorías de impacto de los áridos ligeros que incorporan un 2,5% de residuos clasificados por tipo de arcilla: SY (a), PY (b) y PR (c).	148
Figura 49. Esquema del proceso seguido para la obtención de LWA con RW y GW.	162
Figura 50. Escenarios comparados en esta investigación: CA, RWA y GWA.	163
Figura 51. Esquema de la producción de LWA y límites del sistema considerados.	164
Figura 52. Distribución granulométrica acumulada tras la molienda del material.	166
Figura 53. LWA obtenidos a partir de lana de roca (izq.) y lana de vidrio (der.).	168
Figura 54. Contribución de los impactos relacionados con la fabricación de 1 kg de CA, RWA y GWA en diferentes etapas.	170
Figura 55. Caracterización medioambiental comparativa para CA, RWA y GWA.	172
Figura 56. Ejemplo de un sistema de producto.	204
Figura 57. Conjunto de procesos unitarios dentro de un sistema de producto.	205
Figura 58. Las cinco etapas de la evaluación del impacto del ciclo de vida.	225

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Programas para análisis de ciclo de vida.....	41
Tabla 2. Algunas metodologías de impacto incluidas en SimaPro.....	43
Tabla 3. Análisis elemental de la arcilla SW.....	79
Tabla 4. Contenido en carbono de la arcilla SW.....	79
Tabla 5. FRX de la arcilla SW.....	79
Tabla 6. DRX de la arcilla SW.....	79
Tabla 7. Análisis elemental de la arcilla SY.....	80
Tabla 8. Contenido en carbono de la arcilla SY.....	80
Tabla 9. FRX de la arcilla SY.....	80
Tabla 10. DRX de la arcilla SY.....	80
Tabla 11. Análisis elemental de la arcilla PR.....	81
Tabla 12. Contenido en carbono de la arcilla PR.....	81
Tabla 13. FRX de la arcilla PR.....	82
Tabla 14. DRX de la arcilla PR.....	82
Tabla 15. Análisis elemental de la arcilla PY.....	83
Tabla 16. Contenido en carbono de la arcilla PY.....	83
Tabla 17. FRX de la arcilla PY.....	83
Tabla 18. DRX de la arcilla PY.....	83
Tabla 19. Información de la primera publicación.....	92
Tabla 20. Datos de inventario ajustados a 1 kg de áridos ligeros para las distintas fases analizadas: materias primas, extracción, transporte y fabricación.....	99
Tabla 21. Impactos de Caracterización asociados a 1 kg de áridos ligeros que incorporan 0, 1,25, 2,5 y 5 % en peso de OP.....	101
Tabla 22. Impactos Normalizados asociados a 1 kg de áridos ligeros que incorporan 0, 1,25, 2,5 y 5 % en peso de OP.....	106
Tabla 23. Información de la segunda publicación.....	112
Tabla 24. Datos de inventario ajustados a 1 kg de ladrillos para las distintas fases analizadas: materias primas.....	117
Tabla 25. Datos de inventario ajustados a 1 kg de ladrillos para las distintas fases analizadas: extracción y transporte.....	117
Tabla 26. Datos de inventario ajustados a 1 kg de ladrillos para las distintas fases analizadas: fabricación.....	118
Tabla 27. Datos de inventario ajustados a 1 kg de ladrillos para las diferentes fases analizadas: fabricación.....	118
Tabla 28. Potencial de calentamiento global, 100 años (kg CO ₂ eq).....	121
Tabla 29. Impactos caracterizados asociados a 1 kg de ladrillos que incorporan 0, 3, 7 y 10 % en peso de OP.....	122
Tabla 30. Impactos normalizados asociados a 1 kg de ladrillos que incorporan 0, 3, 7 y 10 % en peso de OP.....	126
Tabla 31. Información de la tercera publicación.....	132
Tabla 32. Valores caloríficos bruto y neto de los residuos.....	138
Tabla 33. Mezclas y condiciones de sinterización.....	138

Tabla 34. Datos de inventario más relevantes asociados a la producción de 1 kg de áridos ligeros para las distintas fases analizadas: materias primas, extracción, transporte y fabricación.....	142
Tabla 35. Impactos caracterizados asociados a 1 kg de áridos ligeros que incorporan 0 y 2,5 % en peso de AHS, PS, CD y CG, respectivamente.	144
Tabla 36. Impactos normalizados asociados a 1 kg de áridos ligeros que incorporan 0 y 2,5 % en peso de AHS, PS, CD y CG, respectivamente.	150
Tabla 37. Información de la cuarta publicación	158
Tabla 38. Datos de inventario asociados a la producción de 1 kg de áridos ligeros para las distintas fases analizadas: materias primas, extracción, transporte y fabricación.....	165
Tabla 39. Composición química de las materias primas y las mezclas.....	167
Tabla 40. Resultados de los límites de Atterberg y del contenido óptimo de humedad para las mezclas estudiadas.	168
Tabla 41. Propiedades tecnológicas de los LWA obtenidos en este estudio.	169
Tabla 42. Impactos asociados a 1 kg de CA, RWA y GWA.	171
Tabla 43. Impactos normalizados asociados a 1 kg de CA, RWA, GWA.	172
Tabla 44. Categorías de impacto más utilizadas	219
Tabla 45. Categorías de impacto más utilizadas	220
Tabla 46. Información de la primera publicación complementaria.....	255
Tabla 47. Información de la segunda publicación complementaria.....	257
Tabla 48. Información de la tercera publicación complementaria.....	259
Tabla 49. Información de la cuarta publicación complementaria.....	261
Tabla 50. Información de la quinta publicación complementaria	263
Tabla 51. Información de la sexta publicación complementaria.....	265
Tabla 52. Información de la séptima publicación complementaria.....	267

CAPÍTULO I

Introducción

INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación general y alcance de este estudio

Los materiales de construcción se encuentran entre los materiales más usados en todo el mundo. Destacar, a modo de ejemplo, que los áridos son la segunda materia prima más consumida por el hombre después del agua y cada español consumió en 2021 unos 2.890 kilogramos (ANEFA, 2022), o que la producción anual mundial de ladrillos es actualmente cerca de 1500 billones de unidades y se espera que su demanda vaya en constante aumento (Robayo-Salazar, Mejía de Gutiérrez, & Mulford-Carvajal, 2016). Además, las operaciones de explotación de canteras para la obtención de la materia prima básica para estos productos, son intensivas a nivel energético y afectan de manera negativa al paisaje. De hecho, países como China han empezado a limitar el uso de ladrillos de arcilla para proteger las reservas de este material. En el caso de Europa, las cerámicas tradicionales representan más del 60% de la producción del sector cerámico (HISPALYT, 2022). El sector de áridos es el principal suministrador de materias primas para la construcción de infraestructuras, edificación, industria y protección del medio ambiente, lo que le confiere el carácter de industria estratégica.

En cuanto al consumo de energía, indicar que la producción de ladrillos consume de forma aproximada la mitad de la energía total utilizada por todo el sector de la cerámica. Por otra parte, los hornos de sinterización y rotatorios de estas industrias trabajan a altas temperaturas y no solo consumen gran cantidad de energía, sino que liberan una gran cantidad de gases de efecto invernadero. No debemos olvidar, tal como se recoge en el *«Manifiesto de Barcelona»*, documento elaborado en la Conferencia Mundial de Edificios Sostenibles celebrada en 2014, que el sector de la construcción es responsable de un tercio de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, un tercio del consumo de energía y un tercio de la generación de residuos y el agotamiento de los recursos, en términos globales (Manifiesto de Barcelona, 2014).

Para detener este impulso, el *«Manifiesto de Barcelona»* concluye que es absolutamente necesario establecer objetivos precisos para enfrentar esta tendencia, proponiendo un objetivo de reducción de emisiones del 77%, tanto a través de la eficiencia y el ahorro energético, como a través de la descarbonización de la energía utilizada por la construcción. Pero va aún más allá al afirmar que es crucial que se produzca un cambio de paradigma hacia la sostenibilidad dentro del sector de la construcción. Por lo tanto, la edificación sostenible se está convirtiendo en una de las más importantes transformaciones sociales, económicas y culturales de nuestro tiempo porque, además de una obligación medioambiental, es una forma de progreso que devuelve a la construcción su compromiso con las personas y su medio. En el escenario descrito se hace indispensable obtener avances

tecnológicos significativos que permitan obtener materiales sostenibles para nutrir la demanda del sector de la construcción. En este sentido el impacto ambiental que supone la fabricación de materiales de construcción puede ser disminuido de forma efectiva si se utilizan residuos como materias primas para su formulación.

La valorización de residuos para la producción de materiales puede suponer un ahorro significativo en consumo energético y materias primas tradicionales, así como mejorar la rentabilidad económica relacionada con su fabricación. Existe numerosa bibliografía científica sobre materiales de construcción elaborados a partir de residuos: ladrillos cerámicos (Murmu & Patel, 2018; Muñoz, Morales, Mendivil, & Muñoz, 2014; Zhang, Choy Wonga, Arulrajah, & Horpibulsuk, 2018), áridos ligeros (Dondi, y otros, 2016; Nor, y otros, 2016; Moreno-Maroto, González-Corrochano, Alonso-Azcárate, Rodríguez, & Acosta, 2017), hormigones (Johnson Alengaram, Abdullah Al Muhit, & M., 2013; Singh, Mithulraj, & Arya, 2018; Tugrul Tunc, 2019), etc. Pero aparte de las ventajas expuestas, la utilización de residuos como materia prima en el proceso de fabricación de materiales de construcción evitaría el impacto ambiental consecuencia de su generación, tal y como se especifica en el Libro Verde sobre Política Integrada de Producto U.E. (COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS, 2001).

En el escenario descrito en los últimos años están surgiendo iniciativas encaminadas al análisis de la sostenibilidad de los materiales de construcción, con la intención de intentar minimizar los impactos de este sector sobre el medio ambiente. Una de las herramientas que se pueden aplicar para mejorar los productos y los procesos es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV o *Life Cycle Assessment*, LCA). Esta herramienta permite comparar varias opciones o alternativas para seleccionar la más conveniente desde el punto de vista medioambiental. Está basada en el concepto de Ciclo de Vida (CV), que la Directiva 2014/24/UE define como:

«Todas las fases consecutivas o interrelacionadas, incluidos la investigación y el desarrollo que hayan de llevarse a cabo, la producción, la comercialización y sus condiciones, el transporte, la utilización y el mantenimiento, a lo largo de la existencia de un producto, una obra o la prestación de un servicio, desde la adquisición de materias primas o la generación de recursos hasta la eliminación, el desmantelamiento y el fin de un servicio o de una utilización».

La presente tesis se plantea como un proyecto innovador que propone realizar un estudio comparativo del Análisis de Ciclo de Vida de materiales de construcción tradicionales y fabricados a partir de residuos, que permita determinar el impacto global del CV de los diferentes productos evaluados. Todo ello, con el objetivo de establecer las mejores opciones medioambientalmente sostenibles, aumentar la cantidad de información

disponible sobre el producto y su proceso e identificar puntos de mejora que se puedan proponer en un futuro.

1.2 Economía Circular como motor del cambio

La economía circular es un enfoque económico y ambiental que busca maximizar el uso de los recursos naturales mediante el diseño, producción, consumo y gestión de los residuos de manera sostenible. El objetivo es cerrar los ciclos de materiales y energía para reducir el impacto ambiental y mejorar la eficiencia económica. Esto se logra mediante la reutilización, reparación, remanufacturación, y reciclaje de productos y materiales, así como la generación de energía a partir de residuos. La economía circular se enfoca en la creación de sistemas de producción y consumo más eficientes y sostenibles, mediante la reducción del uso de recursos y la minimización de residuos y emisiones, en lugar de la extracción y el consumo de recursos naturales a un ritmo desmedido. Esto puede lograrse mediante la implementación de tecnologías y prácticas sostenibles en la producción y el consumo acompañadas de la creación de políticas y regulaciones adecuadas.

Aunque ya está siendo adoptada por empresas, gobiernos y otras organizaciones en todo el mundo, aún hay muchos desafíos a superar para lograr una economía circular completa, incluyendo la necesidad de una mayor colaboración entre los diferentes sectores y la creación de nuevos sistemas de producción y consumo. La economía circular tiene un gran potencial para mejorar la calidad de vida de las personas y para contribuir al desarrollo sostenible. Algunas de las implicaciones para la sociedad son las siguientes:

- *Mejora de la eficiencia económica:* la economía circular puede ayudar a reducir los costos y aumentar la eficiencia al maximizar el uso de los recursos y reducir los residuos.
- *Mejora de la sostenibilidad ambiental:* la economía circular puede ayudar a reducir el impacto ambiental al reducir la extracción de recursos naturales y la generación de residuos.
- *Creación de empleos:* la economía circular puede generar nuevos empleos en áreas como el reciclaje, la reparación, la remanufacturación y la generación de energía a partir de residuos.
- *Mejora de la calidad de vida:* la economía circular puede contribuir a mejorar la calidad de vida al reducir la contaminación y mejorar el acceso a recursos y servicios sostenibles.
- *Mayor transparencia y responsabilidad:* la economía circular puede fomentar la transparencia y la responsabilidad en la producción y el consumo, al exigir que las empresas y los consumidores asuman una mayor responsabilidad por el ciclo de vida de los productos y los residuos que generan.

Sin embargo, es importante destacar que implementar una economía circular requiere de un cambio de paradigma en la producción y consumo de los productos, así como en la gestión de los residuos generados y una planificación estratégica a nivel nacional e internacional.

Los residuos procedentes de la industria, estimados en miles y miles de millones de toneladas anuales, no solo suponen una contaminación ambiental severa, sino que en ellos existe una elevada energía embebida, y valor económico invertido, por lo que una gestión enfocada a su eliminación en vertedero eliminaría una oportunidad de aprovechamiento. La economía circular pretende que estos se revaloricen como materia prima para que actúen como nutrientes tecnológicos en las cadenas de producción, ya sea en procesos previos readaptados o completamente novedosos. Los residuos son una fuente potencial de materiales y energía que pueden ser valorizados para crear productos nuevos o proporcionar una fuente adicional de energía. La composición de los residuos puede ser altamente variable dado que provienen de procesos industriales de cualquier tipología, es por ello que su destino y aplicabilidad dependerán de su composición y comportamiento.

El uso de residuos en la economía circular es beneficioso por varias razones:

- *Reducción de residuos:* El uso de residuos como materia prima reduce la cantidad de estos que se envían a vertederos y, por lo tanto, reduce la presión sobre los recursos naturales.
- *Ahorro de recursos:* Emplearlos como materia prima reducirá la necesidad de materiales vírgenes y, por lo tanto, ahorrar recursos naturales.
- *Generación de empleo:* Su utilización como materia prima puede crear nuevos empleos en la industria de reciclaje, recuperación y valorización.
- *Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero:* A su vez, esta nueva finalidad puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al evitar la extracción de materiales vírgenes y la eliminación de residuos en vertederos.
- *Promoción de la innovación:* De este modo, puede estimular la innovación en el diseño de productos y procesos, lo que puede conducir a una mayor eficiencia y sostenibilidad, lo que a su vez puede reducir los costos de producción y los impactos ambientales asociados con la fabricación de nuevos productos.

En resumen, la economía circular prolonga la vida de los materiales, reduciendo la necesidad de producir nuevas materias primas, minimizando así la cantidad de desecho generado y promoviendo la eficiencia de los recursos naturales. Esto contribuye a una mayor sostenibilidad económica, social y ambiental.

1.3 Introducción a los contenidos del estudio

En las últimas décadas, la consideración de los impactos ambientales ha evolucionado de manera notable hasta alcanzar la visión actual del Ciclo de Vida. A grandes rasgos, la evolución que nos ha permitido llegar al concepto del método que tenemos hoy en día tiene su origen en el auge de la revolución industrial. Fue en esta época, cuando los impactos ambientales de la industria se hicieron cada vez más evidentes, aunque sin cobrar el protagonismo que presentan en la actualidad. La convivencia con los gases procedentes de la combustión de carbón, y otros procesos, en constante aumento, resultaba inviable. Fue por este motivo que se comenzaron a tomar una serie de decisiones necesarias para alejar las sustancias peligrosas de las zonas habitadas: La construcción de tuberías y chimeneas. Sin embargo, se dieron cuenta de que esto no resolvía el problema, sino que solo lo desplazaba. El siguiente paso evolutivo, fue hacer hincapié en las emisiones y tratarlas antes de su expulsión al medio. Se adoptaron soluciones de final de línea como filtros y tratamientos químicos. Con esta medida, se conseguía eliminar o disminuir la contaminación de algunos medios por retención o concentración en otros. Se realizaba una transferencia de contaminación entre medios, pero se mantenía el problema generado a nivel global.

Con el tiempo, se comenzó a enfocar en la eficiencia y limpieza de los procesos, con el objetivo de reducir la cantidad de residuos y la extracción de materias primas no renovables. Actualmente, se adopta una perspectiva de producto, en lugar de la perspectiva de proceso, con el objetivo de que el producto sea lo más limpio posible durante todo su ciclo de vida.

En muchos productos, los impactos ambientales principales no se generan durante la producción. Por ejemplo, un coche provoca sus mayores impactos ambientales durante los años en que es utilizado por el usuario, debido al consumo de combustible fósil y a las emisiones que realiza durante su utilización. Por ello, para hacer que el vehículo sea más respetuoso con el medio ambiente, se debe intentar mejorar su comportamiento ambiental durante su etapa de uso y no única o principalmente durante su producción.

A medida que aumenta la conciencia ambiental en la sociedad, las industrias y las empresas empiezan a darse cuenta de la importancia de evaluar cómo afectan sus actividades al medio ambiente. En la sociedad hay una preocupación creciente por los problemas derivados del agotamiento de los recursos naturales y la degradación ambiental. A esta demanda social, las empresas responden ofreciendo productos «más verdes» y empleando procesos de producción «más limpios».

Los efectos sobre el medio ambiente de los productos y los procesos se han convertido en una cuestión clave, razón por la cual hay numerosas iniciativas dedicadas a investigar las estrategias para su minimización. Cada vez más empresas llegan a la conclusión de que merece la pena ir más allá del estricto cumplimiento legal y adoptan estrategias de

prevención de la contaminación implantando sistemas de gestión ambiental para mejorar su desempeño ambiental. Una de las herramientas más eficientes que se pueden aplicar para mejorar la sostenibilidad de los productos y procesos es el Análisis de Ciclo de Vida (Curran, 2006; Meire Montaña, 2016).

1.4 Análisis de Ciclo de Vida

El Análisis de Ciclo de Vida tiene su origen a finales de los años sesenta y principios de los setenta, cuando se presentaron los resultados de un estudio como perfiles de recursos y de emisiones (Hunt, Franklin, Welch, Cross, & Woodall, 1974), y en los que no se realizó ninguna evaluación cuantitativa de los impactos asociados sobre el medio ambiente o los recursos (Huppel & Curran, 2012).

En la década de 1980, se produjo un aumento en el uso del ACV, en particular para estudios de envases (Bundesamt für Umweltschutz (BUS), 1984; Franke, 1984; Lundholm & Sundström, 1985), y a principios de los noventa se formaron varios grupos de trabajo científicos relacionados con el ACV bajo los auspicios de la Sociedad de Toxicología y Química Medioambientales (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry* o SETAC) (Klöppfer, 2006). Se hizo evidente la necesidad de una evaluación de los impactos ambientales de los resultados del inventario para aumentar la interpretabilidad de los resultados del ACV.

Los primeros métodos para la evaluación de los impactos ambientales en el ACV se publicaron a principios de la década de los noventa con ejemplos destacados como la metodología suiza de escasez de ecosistemas (*Swiss Ecoscarcity* o *Ecopoints*) (Ahbe, Braunschweig, & Müller-Wenk, 1990) y la metodología CML 1992 (Heijungs, y otros, 1992).

En 1993, se inició un proceso de normalización para el ACV en el marco de la Organización Internacional de Normalización (ISO), que dio lugar a un marco común y a principios fundamentales, incluida una norma específica relativa a la Evaluación del Inventario del Ciclo de Vida (EICV): *ISO 14040 1997* (ISO, 14040, 1997). Junto con las normas que describen la modelización del inventario del ciclo de vida: *ISO 14041: 1998* (ISO, 14041, 1998) y la interpretación: *ISO 14043: 2000* (ISO, 14043, 2000).

En 2006, una norma para la fase EICV: *ISO 14042: 2000* (ISO, 14042, 2000), se fusionó con la norma ISO 14044, dando como resultado: *ISO 14044: 2006* (ISO, 14044, 2006) que, junto con una versión actualizada de la norma básica del ACV: *ISO 14040: 2006* (ISO, 14040, 2006), constituye la norma actual para el análisis de ciclo de vida.

De forma paralela a la elaboración de la norma ISO, un gran número de proyectos nacionales, sobre todo en Canadá, Dinamarca, Japón, los Países Bajos, Suecia, Suiza y los Estados Unidos, se centraron específicamente en el desarrollo futuro de las metodologías de la EICV: *EDIP* (Wenzel, Hauschild, & Alting, 1997), *CML 2002* (Guinée, y otros, 2002), *Ecoindicator 99* (Goedkoop & Spriensma, 2000), *EDIP2003* (Hauschild & Potting, 2005), *EPS*

(Steen, *A Systematic Approach to Environmental Priority Strategies in In Product Development (EPS)*. Version 2000 – General System Characteristics., 1999a; Steen, *A Systematic Approach to Environmental Priority Strategies in In Product Development (EPS)*. Version 2000 – Models and Data, 1999b), *IMPACT 2002+* (Jolliet, y otros, 2003), *TRACI* (Bare, Norris, Pennington, & McKone, 2002), *LIME* (Itsubo, Sakagami, Washida, Kokubu, & Inaba, 2004), *LUCAS* (Toffoletto, Bulle, Godin, Reid, & Deschênes, 2007) y *ReCiPe* (Goedkoop, y otros, 2009). La mayor parte de las primeras metodologías se basaron en métodos de punto medio, lo que significa que el indicador para una categoría de impacto se eligió en algún punto intermedio de la vía de impacto subyacente (*por ejemplo, CML 2002, EDIP, TRACI*). El número de categorías de impacto incluidas en estas metodologías variaba, pero normalmente era superior a diez e incluía impactos como el calentamiento global, el agotamiento del ozono estratosférico, la toxicidad humana y la acidificación.

Durante ese tiempo, el trabajo de desarrollo de métodos de parámetros progresó (*Eco-indicator 99, EPS*), lo que permitía dirigir la evaluación de impacto hacia indicadores situados al final de la trayectoria de impacto, como la salud humana, la calidad de los ecosistemas y la escasez de recursos. La modelización de parámetros también se inspiró en el trabajo conjunto sobre la monetización de los impactos ambientales de las tecnologías energéticas (Spadaro & Rabl, 2002). La principal ventaja de los indicadores de punto medio es su solidez científica relativamente fuerte, mientras que los indicadores de punto final se suponen más fáciles de interpretar (Bare, Hofstetter, Pennington, & Udo de Haes, 2000). Más en la actualidad, los enfoques de punto medio y de punto final se han combinado en una metodología EICV para mejorar la coherencia en la modelización de las vías de impacto (*LIME, ReCiPe, IMPACT 2002+*).

La norma ISO 14044 trajo la estandarización de los principios básicos, pero la norma no especificaba qué métodos EICV aplicar en la práctica, sino que aconsejaba al profesional sobre la aplicación de métodos de aceptación científica general e internacional.

Ninguno de los métodos mencionados anteriormente puede decirse que goce de tal aceptación general, y por lo tanto el profesional del ACV quedó con una orientación limitada sobre la elección entre un gran número de métodos diferentes de la EICV que pueden dar resultados y conclusiones muy diferentes del estudio de ACV (Dreyer, Niemann, & Hauschild, 2003; Pant, y otros, 2004).

Desde principios de los años noventa y en paralelo al desarrollo de las normas ISO, se han realizado varios intentos de armonizar el campo de la EICV para evitar la confusión que surge cuando se pueden aplicar varios métodos diferentes. Este trabajo fue realizado, en particular, por grupos de expertos de la SETAC en Europa y América del Norte, seguidos posteriormente por grupos de trabajo en el marco de la Iniciativa del Ciclo de Vida del UNEP/SETAC, que en 2002 comenzaron a trabajar en la identificación de una práctica óptima recomendada (Klöpffer, 2006).

Si bien estas actividades han dado lugar a cierto consenso sobre los principios para los mejores enfoques (Udo de Haes, y otros, 2002), no han dado lugar a un conjunto uniforme de métodos de caracterización aceptados a nivel mundial, salvo en el caso de unas pocas categorías de impacto. Los resultados de este proceso han sido prometedores:

- Consenso sobre la necesidad de fusionar los modelos de punto medio y de punto final en un marco coherente para combinar las ventajas de ambos conceptos (Bare, Hofstetter, Pennington, & Udo de Haes, 2000).
- Desarrollo de un conjunto genérico de criterios de calidad para evaluar los métodos de caracterización, y aplicación de estos criterios a los métodos de evaluación de impacto más utilizados (Bare, Hofstetter, Pennington, & Udo de Haes, 2000; Margni, y otros, 2007).
- Para las categorías de impacto relacionadas con la toxicidad, se alcanzó un consenso entre los desarrolladores de modelos sobre lo que puede caracterizarse como mejor práctica, incluyendo el desarrollo de un modelo de consenso científico para la caracterización de los impactos tóxicos sobre la salud humana y los ecosistemas (Hauschild M. , y otros, 2008; Rosenbaum, y otros, 2008).

Como un desarrollo reciente, la Comisión Europea creó recomendaciones de mejores prácticas para el ACV y la EICV bajo el Sistema Internacional de Datos del Ciclo de Vida (*International Life Cycle Data system* o *ILCD*) para apoyar sus directrices sobre la Huella Medioambiental. Para las recomendaciones sobre las prácticas de la EICV, se siguió un procedimiento sistemático que comenzó con el desarrollo de criterios coherentes para una buena práctica de modelización de la caracterización.

Los criterios se aplicaron a continuación a los métodos de la EICV existentes para llegar a las mejores recomendaciones de entre los métodos existentes para una amplia gama de categorías de impacto, tanto de punto medio como de punto final. Las recomendaciones resultantes fueron examinadas en amplias audiencias de expertos y partes interesadas, y el resultado de este proceso ahora precisa los métodos de la EICV que se aplicarán en el trabajo de la Huella Medioambiental Europea (Hauschild, y otros, 2013).

Más recientemente, la Iniciativa del Ciclo de Vida del UNEP/SETAC lanzó un proyecto emblemático para desarrollar recomendaciones globales de mejores prácticas para una serie de categorías de impacto, siguiendo un enfoque orientado al consenso científico (Jolliet, y otros, 2014).

Si bien a lo largo de los años se han realizado importantes progresos científicos y durante décadas se ha venido trabajando en la normalización internacional y la creación de una opinión común de los científicos, la ciencia de la modelización de la EICV está aún en fase de desarrollo.

Las áreas de interés incluyen la mejora de la modelización de los puntos finales para todos los impactos cubiertos por la EICV, y el desarrollo de métricas comunes, en particular para el punto final del ecosistema natural, a fin de permitir la agregación del impacto de muchas categorías de puntos medios sobre la base de la modelización del daño a su ecosistema. También se centra en el desarrollo de métodos de caracterización de las categorías de impacto regional que puedan aplicarse de manera coherente en regiones de todo el mundo, y en la consideración de las diferencias, a menudo importantes, en las sensibilidades a escala local o regional, que son cruciales a la hora de modelizar los impactos ambientales (Hauschild & Huijbregts, Life Cycle Impact Assessment, 2015).

1.5 Metodología del ACV

Todo ACV que cumpla con la norma ISO 14040, debe seguir una serie de etapas preestablecidas como son la definición del objetivo y alcance, el análisis de inventario, la evaluación del impacto e interpretación de resultados. A continuación, procederemos a analizar cada una de estas fases.

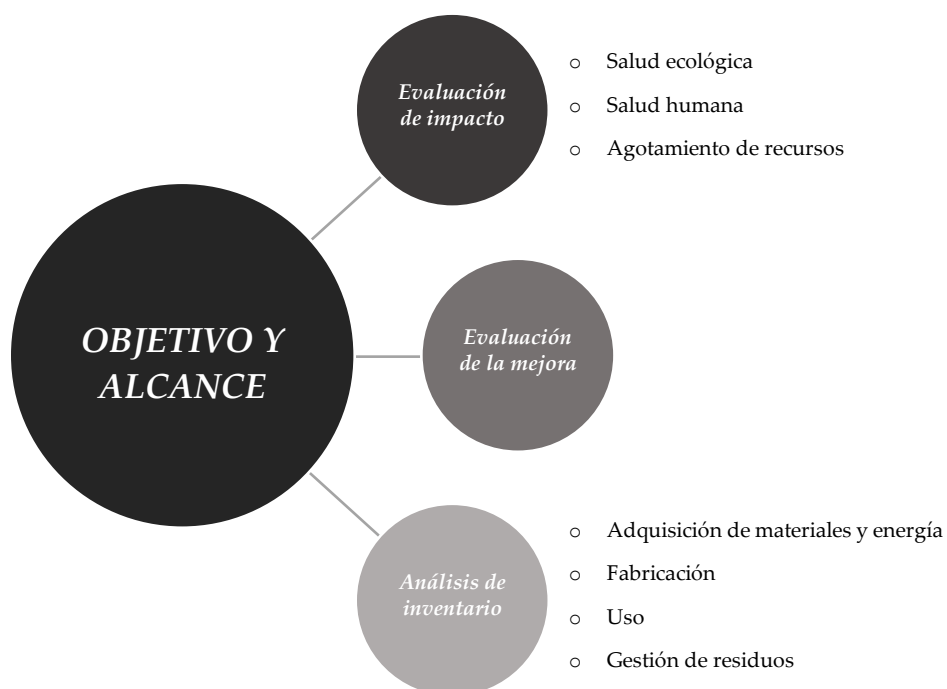


Figura 1. Marco técnico para el análisis del ciclo de vida.

1.5.1 Definición del objetivo y alcance

La definición del objetivo y del alcance es la primera fase de una evaluación del ciclo de vida que contiene las siguientes cuestiones principales:

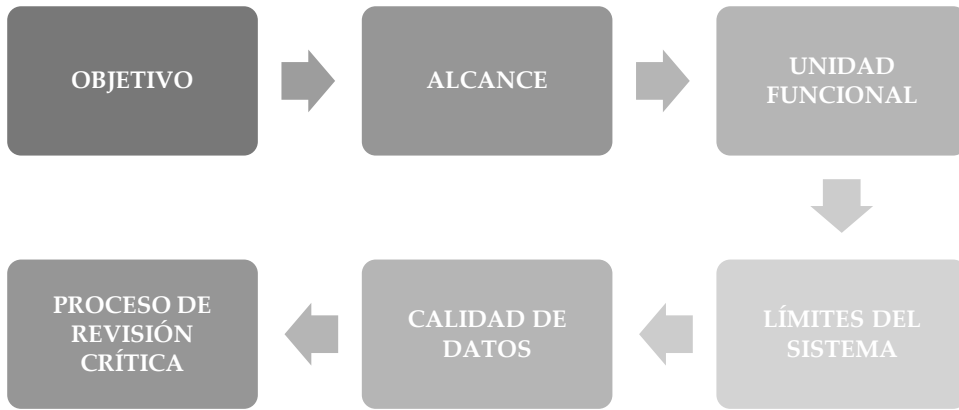


Figura 2. Flujo principal de la definición del objetivo y alcance.

La definición del objetivo y el alcance son las partes críticas de un ACV debido a la fuerte influencia en el resultado del mismo. En las directrices nórdicas sobre evaluación del ciclo de vida se enumeran las siguientes decisiones y definiciones mínimas que deben tomarse (Lindfors, y otros, Nord 1995:20: Nordic guidelines on life-cycle assessment, 1995):

- el propósito y la aplicación prevista
- la función de los sistemas estudiados y de una unidad funcional definida
- el grupo de productos estudiado y las alternativas elegidas, si procede
- los límites del sistema aplicados
- la calidad de datos necesaria
- el proceso de validación o revisión crítica necesario

En el ANEXO C: Etapas del ACV y Bases de datos se desarrollan de manera detallada las diferentes cuestiones que se plantean en este punto (Astrup Jensen, y otros, 1997).

1.5.2 *Análisis de inventario*

El análisis de inventario es la segunda fase de un ciclo de vida en el que se incluyen los siguientes aspectos principales:



Figura 3. Partes principales del análisis de inventario.

Las diferentes cuestiones se describirán en detalle a continuación. La descripción se basará en la terminología definida por la ISO 14040. El análisis de inventario y las tareas a realizar pueden obviamente ser respaldadas por un diagrama de flujo para el producto considerado; un ejemplo de un diagrama de flujo puede verse en la Figura 4 (Astrup Jensen, y otros, 1997). Cada una de las diferentes fases puede estar compuesta por diferentes procesos individuales, *por ejemplo*, la producción de diferentes tipos de materias primas que se combinarán en la fase de producción de materiales. Las diferentes fases a menudo están conectadas por procesos de transporte. La reutilización, generalmente, implica un proceso de descontaminación.

La compilación de un diagrama de proceso adecuado es crucial para el éxito del estudio de ACV, es decir, asegurarse de incluir todos los procesos relevantes, etc. El diagrama del proceso también tiene una función en el informe del ACV mientras que mejora la transparencia del estudio. En el ANEXO C: Etapas del ACV y Bases de datos se amplía la información de las distintas partes en las que se divide el inventario del ACV.

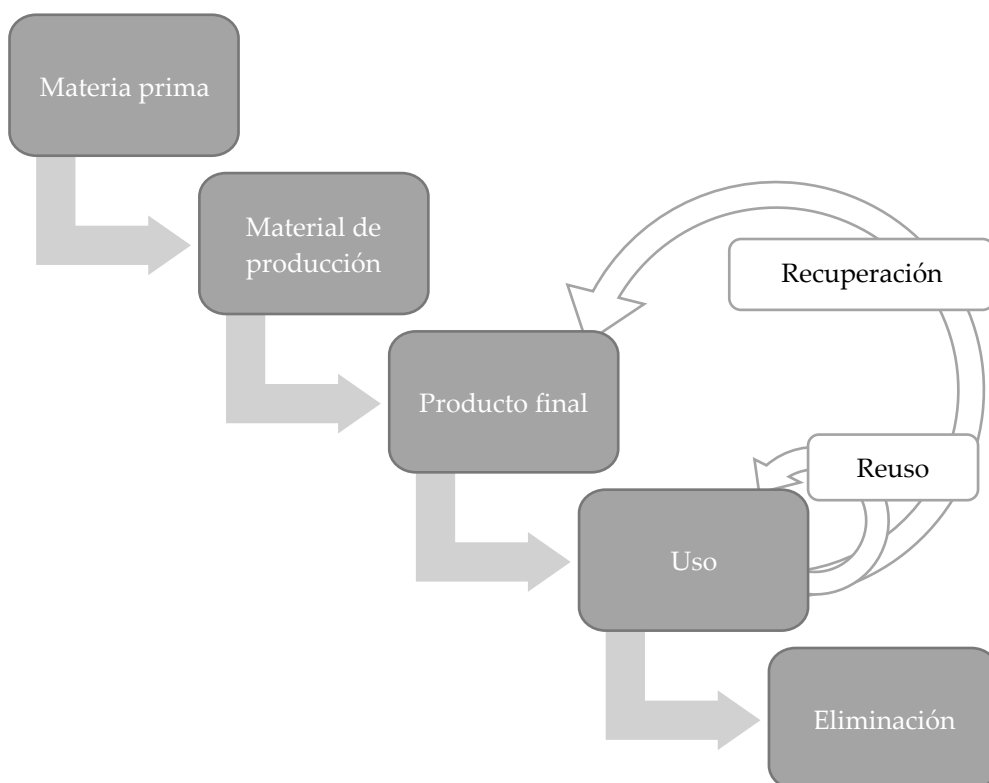


Figura 4. Ejemplo de diagrama de flujo utilizado en la recopilación de datos.

1.5.3 Evaluación de impacto

La evaluación de impacto es la tercera fase de una evaluación del ciclo de vida que contiene las siguientes cuestiones principales:



Figura 5. Partes principales de la evaluación de impacto.

La evaluación de impacto puede expresarse como un «proceso cuantitativo y/o cualitativo para caracterizar y evaluar los efectos de las intervenciones ambientales identificadas en la tabla de inventario» (Heijungs, R.; Hofstetter, P., 1996). Según estos autores: «el componente de evaluación de impacto consiste en principio en los tres o cuatro elementos siguientes: clasificación, caracterización, (normalización,) y valoración»; la normalización y la valoración se fusionan a veces. Se propone que la ISO (ISO, 14040, 2006) cambie la valoración a ponderación y el grupo de trabajo SETAC-Europa (Udo de Haes, Towards a methodology for life cycle impact assessment, 1996) ha adaptado esta terminología. La terminología se presenta en el ANEXO B: Glosario de términos.

El marco para la evaluación del impacto del ciclo de vida se define de la siguiente manera (ISO, 14040, 2006):

El marco de evaluación del impacto del ciclo de vida y su procedimiento deben ser transparentes y ofrecer la flexibilidad y practicidad necesarias para esta amplia gama de aplicaciones. Una amplia gama de niveles de esfuerzo e intensidad del análisis es posible con la evaluación del ciclo de vida para diferentes aplicaciones. Además, la evaluación de impacto debería ser eficaz en términos de coste y recursos utilizados.

La evaluación del impacto del ciclo de vida se compone de varios elementos individuales. Se trata de la definición, clasificación, caracterización y ponderación de categorías. La distinción en diferentes elementos es necesaria por varias razones:

- Cada elemento representa un procedimiento específico diferente;
- No todos los elementos son necesarios para todas las aplicaciones;
- Los métodos, hipótesis y opciones de valor pueden hacerse más transparentes y documentarse y revisarse;
- Se pueden demostrar los efectos de los métodos, las suposiciones y las opciones de valor sobre los resultados.

Dependiendo del objetivo y alcance del estudio y de la aplicación del estudio, se pueden utilizar todos o parte de los elementos (Astrup Jensen, y otros, 1997). Información ampliada en el ANEXO C: Etapas del ACV y Bases de datos.

1.5.4 Interpretación de los resultados

La interpretación es la cuarta fase de la evaluación del ciclo de vida que contiene las siguientes cuestiones principales (ISO, 14043, 2000):



Figura 6. Partes principales de la interpretación de los resultados.

La interpretación de la evaluación del ciclo de vida es un procedimiento sistemático para identificar, calificar, verificar y evaluar la información de las conclusiones del análisis del inventario y/o de la evaluación del impacto de un sistema, y presentarla con el fin de cumplir con los requisitos de la aplicación según se describen en el objetivo y alcance del estudio.

La interpretación del ciclo de vida es también un proceso de comunicación diseñado para dar credibilidad a los resultados de las fases más técnicas del ACV, es decir, el análisis de inventario y la evaluación de impacto, en una forma que sea comprensible y útil para el encargado de tomar las decisiones.

La interpretación se realiza de manera interactiva junto a las otras tres fases de la evaluación del ciclo de vida. Si se descubre que los resultados del análisis de inventario o de la evaluación de impacto no cumplen los requisitos definidos en la fase de objetivos y alcance, el análisis de inventario debe mejorarse (*por ejemplo, revisando los límites del sistema, recopilando más datos, etc.*), y realizando una mejor evaluación de impacto. Este proceso iterativo debe repetirse hasta que se cumplan los requisitos previamente establecidos, como se puede describir en los siguientes pasos:

1. Identificar los problemas ambientales significativos.
2. Evaluar la metodología y los resultados en cuanto a su integridad, sensibilidad y consistencia.
3. Comprobar que las conclusiones son coherentes con los requisitos del objetivo y alcance del estudio, incluidos, en particular, los requisitos de calidad de los datos, los supuestos y valores predefinidos y los requisitos orientados a la aplicación.
4. En caso afirmativo, informar como conclusiones finales. De lo contrario, se han de repetir los pasos 1 o 2.

Este procedimiento debe repetirse hasta que se cumplan al menos 3 de los puntos.

El objetivo de la interpretación es reducir el número de datos cuantificados y/o declaraciones del análisis de inventario y/o evaluación de impacto a los resultados clave para facilitar un proceso de toma de decisiones basado, entre otras cosas, en el estudio del ACV.

Esta reducción debería ser robusta frente a las incertidumbres en los datos y metodologías aplicadas y ofrecer una cobertura y una representación aceptables de las fases precedentes (Astrup Jensen, y otros, 1997). Puede ampliarse la información de este apartado en el ANEXO B: Etapas del ACV y ANEXO C: Bases de datos.

1.6 Estado del arte científico-tecnológico del análisis de ciclo de vida

El aumento en la conciencia ambiental y la necesidad de reducir el impacto ambiental de los productos y servicios ha llevado a que el análisis del ciclo de vida se convierta en un campo de investigación en constante crecimiento. Este aumento ha quedado palpable en la búsqueda bibliográfica y se ha recogido en la Figura 7 elaborada a partir de datos obtenidos. Dicha figura muestra el número creciente de estudios que abarcan la temática del ACV.

Desde 1990, se han publicado más de 30.000 publicaciones científicas indexadas en JCR relacionadas con el análisis del ciclo de vida, lo que indica la creciente importancia de esta herramienta para la sociedad y la industria. Además, un 7,1% de estos estudios corresponden a materiales de construcción, lo que refleja el interés por investigar y mejorar la sostenibilidad de uno de los sectores industriales con mayor impacto económico y ambiental a nivel mundial.

Esto demuestra que el análisis del ciclo de vida es una herramienta en constante evolución y que existen muchas oportunidades para explorar y mejorar la sostenibilidad de los productos y procesos en diferentes sectores industriales. Además, los resultados de estos

estudios pueden proporcionar información valiosa para la toma de decisiones y el desarrollo de políticas públicas que promuevan la sostenibilidad ambiental.

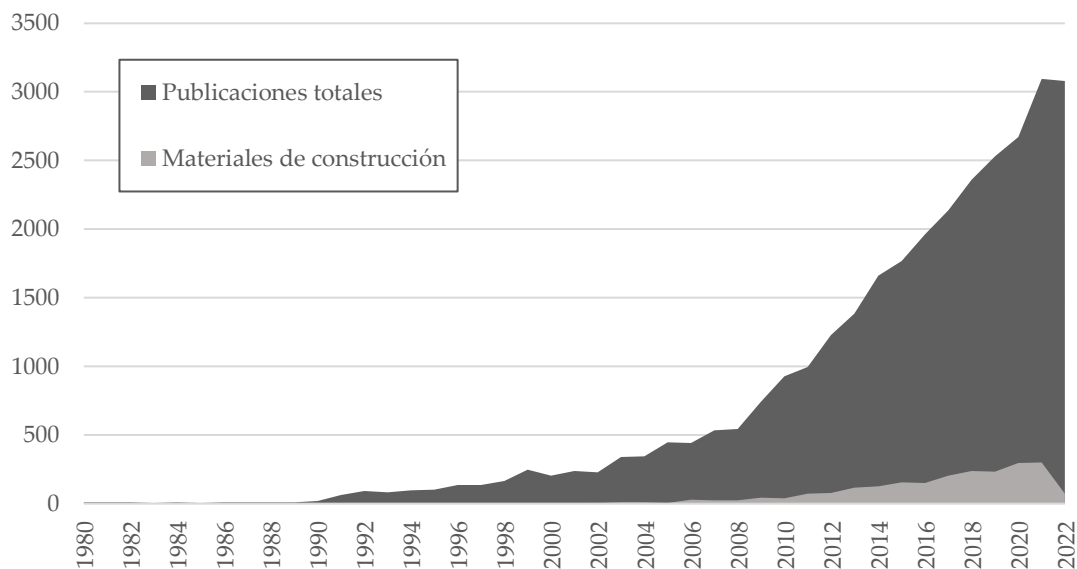


Figura 7. Número de publicaciones científicas sobre ACV desde 1980.

Si nos enfocamos específicamente en el análisis del contenido relacionado con la temática de los ladrillos, se puede observar que los artículos científicos que abordan el impacto ambiental alcanzan su punto máximo de actividad entre los años 2021 y 2022, con un total de 36 y 39 publicaciones respectivamente, lo que indica un creciente interés en esta área de investigación.

Por otro lado, en el caso de los áridos ligeros artificiales, se han publicado muy pocas investigaciones que aborden temas ambientales, con un total de seis publicaciones, como las de Cao y otros (Cao, Diana, Keoleian, & Lai, 2011; Cao, L.; Diana, J.S.; Keoleian, G.A., 2013), que se enfocan en el medio marino, Quina y otros (Quina, Rita Garcia, Simões, & Quinta-Ferreira, 2020), que utilizan cenizas procedentes de residuos sólidos urbanos, y las correspondientes al Grupo de Investigación del autor de esta Tesis, que emplean residuos orgánicos e inorgánicos (Uceda-Rodríguez, y otros, 2020; Uceda-Rodríguez, y otros, 2022; López-García, Uceda-Rodríguez, León-Gutiérrez, Cobo-Ceacero, & Moreno-Maroto, 2022). La comparación entre ambas situaciones se muestra en la Figura 8. Se realizará un análisis más detallado en los próximos capítulos para comparar los distintos residuos utilizados como nutrientes tecnológicos en esta área de investigación.

En general, el aumento en el número de publicaciones sobre Análisis de Ciclo de Vida (ACV) refleja el interés creciente en este campo y la necesidad de mejorar continuamente la metodología y la aplicación del ACV. A medida que esta técnica continúa evolucionando, se espera que siga siendo un área de investigación activa y en constante crecimiento.

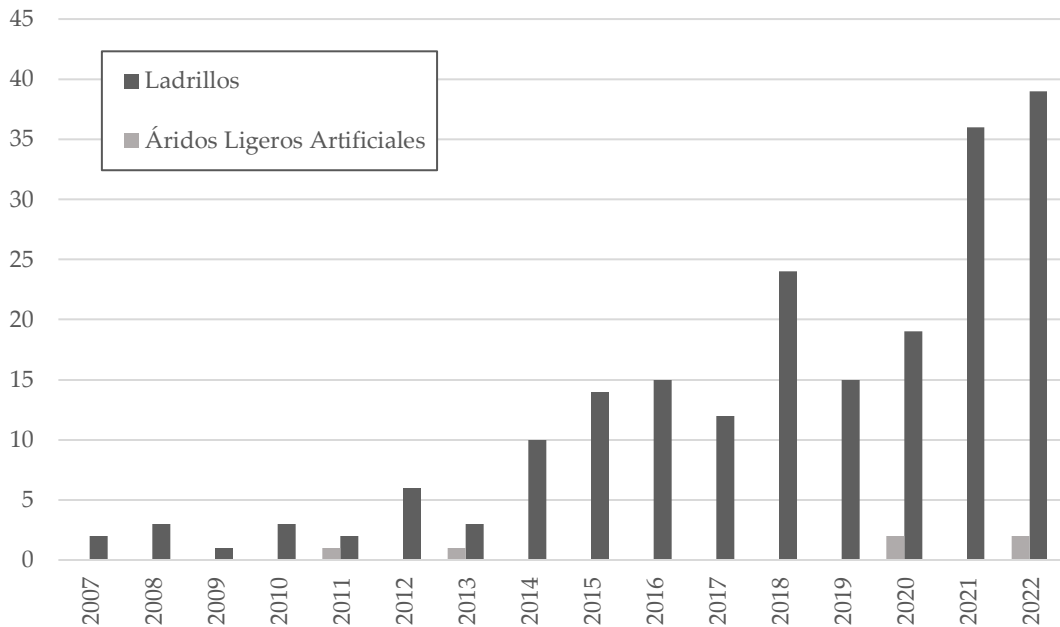


Figura 8. Número de publicaciones científicas sobre ACV de ladrillos y LWA.

1.7 Herramientas informáticas de ACV

Los sistemas, cada día más complejos que se plantean, exigen trabajar con una gran cantidad de datos y procesos. El tratamiento de estos datos, bajo los parámetros y ecuaciones contenidas en las metodologías antes descritas, hace tiempo que dejó de ser una labor sencilla sin el apoyo de herramientas de software que facilite la realización eficiente de un estudio.

En el mercado existe una amplia variedad de programas informáticos que suplen la función buscada, tanto de lo que se denomina software libre como bajo licencia. Las diferencias de ambos radican en la versatilidad de funcionamientos desde el minuto uno. Los primeros, por ejemplo, requieren de un esfuerzo adicional relacionado con la búsqueda de las bases de datos que se requieran y que, de forma general, no son de acceso público. En contraposición, el software bajo licencia ya proporciona en el mismo coste dicho acceso y uso de estas bases de datos desde el principio.

La Tabla 1 (De Wolf & Mauro Cordella, 2020) recopila los principales programas disponibles en la actualidad, así como sus principales características.

De entre los programas mencionados en la Tabla 1, cabe destacar que, en la actualidad, los que presentan mejores prestaciones para la realización de ACV son los programas SimaPro y GaBi 4. De ambos, el software empleado en la realización de los trabajos que se presentaran en capítulos posteriores, ha sido SimaPro. Es por este motivo, que procederemos a ampliar más información sobre el mismo.

Tabla 1. Programas para análisis de ciclo de vida.

Programa	Compañía desarrolladora	Comentarios
Boustead	Boustead Consulting (UK)	Herramienta muy completa adecuada para estudios de ACV en la industria del acero, química y plástica.
Eco-it	Pré Consultants (NL)	Especialmente indicado para diseñadores de productos y envases. Utiliza el Ecoindicator 99. Es fácil de usar.
Ecopro	Sinum A.G. - EcoPerformance Systems (CH)	Permite realizar estudios sencillos del ciclo de vida de los productos. Utiliza la base de datos BUWAL.
Ecoscan	TNO Industrial Technology (NL)	Puede ser utilizado por técnicos y responsables de la implementación del ecodiseño de productos. Tiene varias bases de datos y es fácil de usar.
Euklid	Fraunhofer-Institut (DE)	Programa dirigido a estudios de ACV de productos industriales.
KCL Eco	Finnish Pulp and Paper Research Institute (FI)	Posee una interfaz de usuario muy completa. Utiliza el Ecoindicator 95 o DAIA 98 y dispone de buenos datos para la industria papelera.
GaBi 4	PE INTERNATIONAL GmbH and LBP, University of Stuttgart (DE)	Además de los usos convencionales del ACV, este programa también incluye la posibilidad de realizar un análisis económico a través de la inclusión de los Costos del Ciclo de Vida (CCV) y los impactos sociales a
LCAit	Chalmers Industriteknik (SE)	Su principal aplicación es en el área de envases y productos de papel.
Miet	Leiden University (NL)	Funciona con MS Excel y se basa en datos medioambientales de EE.UU. Se ofrece de manera gratuita.
Pems	Pira International (UK)	Puede ser utilizado por expertos o novatos en el campo. Posee una interfaz de usuario flexible.
SimaPro	Pré Consultants (NL)	Permite realizar ACV utilizando múltiples metodologías de evaluación de impacto. Viene con varias bases de datos completas. Adecuado para departamentos de diseño o I+D
Team	Ecobilan (FR)	Herramienta muy completa, flexible y potente, aunque más complicada de usar. Permite introducir información de costes.
Wisard	Pricewaterhouse Coopers (FR)	Apto para el análisis del impacto económico y ambiental de los residuos sólidos urbanos.
Umberto	Ifeu-Institut (DE)	Proporciona datos de alta calidad y resultados transparentes. Las bibliotecas de datos son completas y flexibles. Adecuado para la realización de ecobalances empresariales.

1.7.1 *SimaPro*

SimaPro es una herramienta completa para desarrollar estudios ACV de una amplia gama de productos, actividades o servicios. Cuenta en su biblioteca con una amplia variedad de bases de datos muy completas. Permite, además, la incorporación de bases de datos externas por si el estudio en específico lo requiriese. Del mismo modo, proporciona una gran flexibilidad en las metodologías de evaluación de impacto incluidas, lo que lo hacen adecuado para una amplia variedad de propósitos.

El software fue desarrollado por PRÉ Consultants en Países Bajos a principios de la década de los noventa y cuenta con usuarios en más de 60 países.

SimaPro ofrece una interfaz de usuario intuitiva, la cual sigue el orden propuesto por la norma ISO 14040, y se puede utilizar para desarrollar modelos parametrizados con análisis de escenarios. Esta disposición puede apreciarse en la Figura 9. Esta herramienta presenta cálculos de evaluación de impacto directo de cada etapa del sistema estudiado y puede analizar escenarios complejos de tratamiento y reciclaje de residuos.

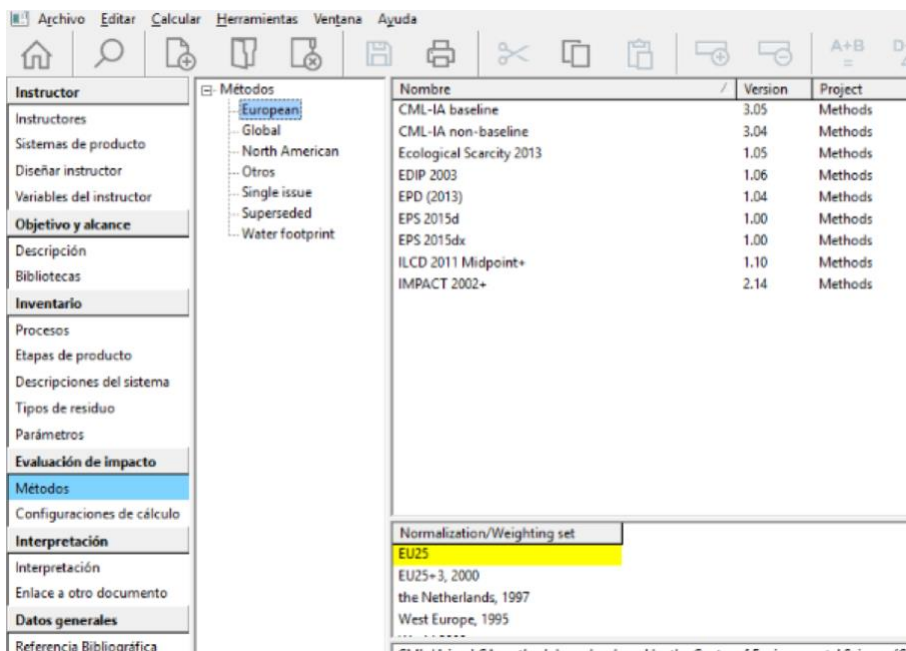


Figura 9. Interfaz y metodologías europeas disponibles en SimaPro.

El programa ofrece análisis de resultados interactivos, lo que permite rastrear los resultados hasta sus orígenes, en tiempo real. También presenta un análisis de puntos débiles, que pueden localizarse de manera muy visual al usar el árbol de procesos para identificar cualquier «punto crítico». La Tabla 2 (Peuportier, y otros, 2007; De Wolf & Mauro Cordella, 2020) especifica de forma breve las características de los métodos de evaluación de impacto más conocidos en SimaPro, entre muchos otros. Estos métodos no son específicos

de SimaPro, y los indicadores correspondientes usados en las herramientas de ACV están descritos más detalladamente en el ANEXO D: Categorías de impacto.

Tabla 2. Algunas metodologías de impacto incluidas en SimaPro.

Método	Características
Impact 2002+	Enfoque de daño; muchas similitudes con el Eco-indicador 99, pero factores de toxicidad completamente recalculados.
TRACI 2002	Método de punto medio desarrollado por la US EPA
CML 2 baseline 2000	Actualización del método de 1992, modelos más avanzados e inclusión de análisis de destino.
EPS 2000	Enfoque del daño, utilizando la monetización (voluntad de pagar) en lugar de la ponderación por parte de un panel.
Eco-indicador 99	Enfoque de daños, utiliza indicadores de categoría a nivel de punto final. Se incluyen tres versiones utilizando diferentes supuestos.
Ecopoints 97 (UBP)	Distancia al objetivo en función de los objetivos de la política suiza (también conocido como método Ecoscarcity o UBP).
EDIP/UMIP 97	Método de caracterización y normalización desarrollado para la EPA danesa. Véase también la versión de 2003
Eco-indicador 95	Método de distancia al objetivo basado en objetivos científicos, incluye aproximación al daño.
CML 92	Método de «punto medio» muy utilizado, caracterización relativamente sencilla, sin destino ni exposición, varios conjuntos de normalización.

SimaPro permite realizar ACV mediante el empleo de bases de datos disponibles en el programa o creadas por el usuario. Las bases de datos disponibles en el programa se alimentan de datos facilitados por numerosas fuentes, entre las que se encuentran centros de investigación, universidades, sectores industriales, entre otros. SimaPro cuenta con tres versiones profesionales (ism, 2018):

- *SimaPro Compact*: es de fácil manejo y da resultados con rapidez. Tiene un asistente que ayuda a gestionar tareas más complejas, pero manteniendo la transparencia de los datos.
- *SimaPro Analyst*: permite modelar ACV detallados, pensado, principalmente, para expertos en ACV. Esta versión también cuenta con elementos avanzados de análisis, como el empleo de parámetros y la realización de análisis de Montecarlo; permite exportar datos a Excel.
- *SimaPro Developer*: está ideado para generar herramientas específicas de ACV con capacidades ampliadas, como enlace directo a ficheros Excel/ASP, opciones de asistente e interface COM. Es utilizada principalmente por grupos de investigación.

1.8 Estado del arte en la obtención de materiales sostenibles

1.8.1 Cerámicos tradicionales

La arcilla es un recurso natural que se encuentra en gran parte del mundo, lo que ha convertido a este elemento en uno de los materiales de construcción más antiguos a lo largo de la historia de la humanidad (Bergaya & Lagaly, 2006). En el Neolítico, se empezaron a fabricar ladrillos con arcillas secadas al aire y los ladrillos de arcilla cocida, hoy conocido como proceso de sinterización, se fabricaban en torno al 4.500 a.C. La producción anual de ladrillos en todo el mundo es actualmente de unos 1,5 billones de unidades y se espera que la demanda de ladrillos aumente continuamente (HZZK, 2019). El ladrillo es uno de los materiales de construcción más utilizados. Aunque las posibilidades de uso del ladrillo son amplias, sigue utilizándose principalmente para la construcción de edificios residenciales. El ladrillo de arcilla proporciona las propiedades de un buen aislante térmico, cumple con la capacidad de almacenamiento de calor y se caracteriza por la capacidad de autorregulación de la humedad como resultado de la alta resistencia a la difusión del vapor de agua y por el buen aislamiento acústico, la alta resistencia al fuego y la larga vida útil (Vracevic, 2019; Netinger, Vračević, & Bačkalić, 2014).

La sinterización es crucial para la fabricación de ladrillos porque permite vitrificar las arcillas y densificar los cuerpos de los ladrillos. La porosidad de los ladrillos se reduce significativamente durante la sinterización con un aumento de la resistencia mecánica. Las fases vítreas producidas son rellenadas por partículas minerales que dan lugar a un producto cerámico duro e insoluble (Bubalo, Vouk, Stirmer, & Nad, 2021). En la Figura 10 puede observarse las reacciones que se producen en el proceso cerámico (Elías Castells, 2005).

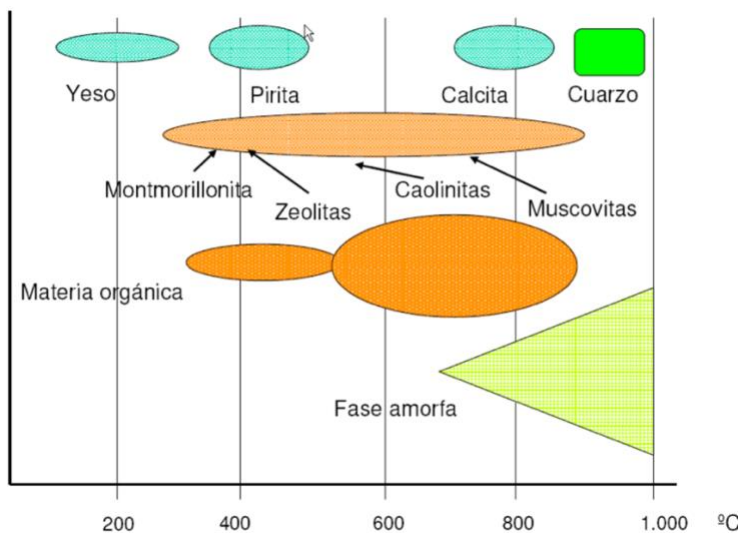


Figura 10. Reacciones en el proceso cerámico.

Dado que las arcillas son materiales naturales con diferentes orígenes, los minerales arcillosos incluidos en la fabricación de ladrillos varían en tipo y contenido. Es importante señalar que, aunque los no especialistas suelen utilizarlos indistintamente, «arcilla» y «mineral de arcilla» son dos conceptos diferentes. Los sedimentólogos utilizan «arcillas» para definir las partículas menores de 4 μm , mientras que los mineralogistas reservan el nombre de minerales de arcilla para clases específicas de filosilicatos según la estructura (Bergaya & Lagaly, 2006). Tradicionalmente, los fabricantes de ladrillos sólo definen las arcillas en función del tamaño de sus partículas ($\leq 2 \mu\text{m}$) (Guzlena, Sakale, Certoks, & Grase, 2019).

Sin embargo, diferentes minerales de arcilla afectan a las propiedades de los ladrillos en función de las estructuras cristalinas, las composiciones elementales, la plasticidad y los comportamientos de contracción (Vasic, Pezo, Zdravkovic, Backalic, & Radojevic, 2017; Freyburg & Schwarz, 2007; Wang, y otros, 2021; Vasić, Pezo, & Radojević, 2020). También pueden producirse defectos en los ladrillos (por ejemplo, agrietamiento, expansión y deformación) si en los materiales de partida hay minerales de arcilla o dosis inadecuadas. Por lo tanto, es fundamental una investigación exhaustiva de la relación entre los minerales de la arcilla y las características de los ladrillos obtenidos (Wang, y otros, 2022).

Por otro lado, la producción de ladrillos se caracteriza por su baja eficiencia energética (Production, 2015). Calkins informó de que la producción de ladrillos requiere entre un 150% y un 400% más de energía que la producción de bloques de hormigón (Calkins, 2008). La producción de ladrillos contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y de carbono negro (BC), que tienen un impacto significativo en la salud humana y en el cambio climático. Además, el sector de la producción de ladrillos se caracteriza por la explotación intensiva de los recursos naturales: los depósitos de arcilla. En 2014, por ejemplo, se extrajeron aproximadamente 10 millones de toneladas de arcilla común solo en Estados Unidos (Bubalo, Vouk, Stirmer, & Nad, 2021; Jewell & Kimball, 2015).

De acuerdo con la norma UNE-EN 771-1:2011/A1:2006, los ladrillos se clasifican en piezas LD o de baja densidad para aquellas que tienen una densidad aparente igual o inferior a 1.000 kg/m³, o en piezas HD o de alta densidad para las que superan dicho valor.

El avance natural de este material se ha enfocado bajo la perspectiva de economía circular al incorporar residuos como nutrientes tecnológicos. Durante la última década del siglo XX, el número de publicaciones científicas comenzaron a despuntar hasta quintuplicarse en la siguiente década, para alcanzar paulatinamente su punto álgido con 585 en 2021 y mantenerse en 2022, como puede apreciarse en la Figura 11.

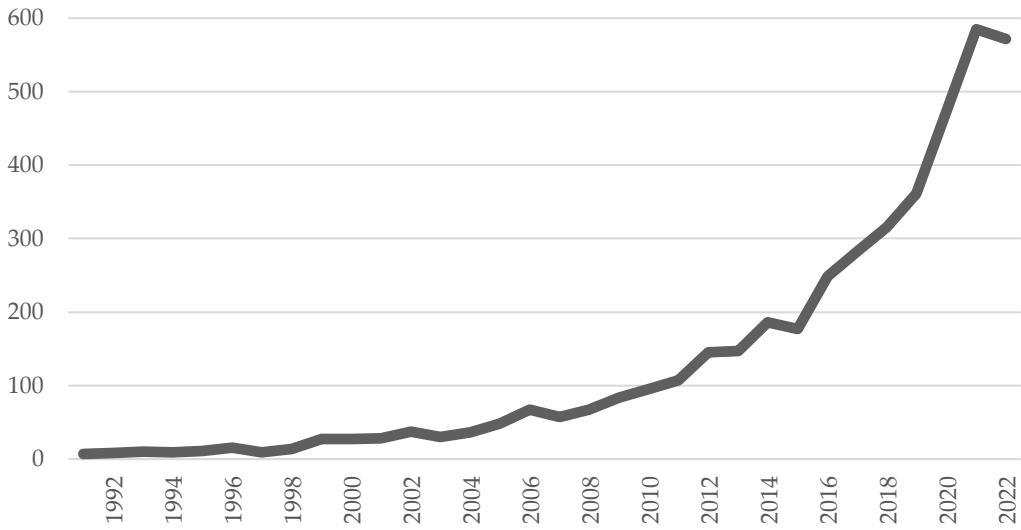


Figura 11. Número de publicaciones científicas sobre ladrillos sostenibles desde 1990.

Se han estudiado una gran variedad de residuos como: cenizas volantes (Lingling, Wei, Tao, & Nanru, 2005), residuos de construcción y demolición (Poon, Kou, & Lam, 2002), serrín de madera (Turgut & Algin, 2007), residuos de algodón (Algin & Turgut, 2008), polvo de piedra caliza (Bilgin, y otros, 2012), residuos de la producción de papel (Sutcu & Akkurt, 2009), lodos de plantas de tratamiento de efluentes de petróleo (Sengupta, Saikia, & Borthakur, 2002), residuos de la producción de pasta kraft (Demir, Baspinar, & Orhan, 2005), colillas de cigarrillos (Aeslina, Abbas, Felicity, & John, 2010), residuos de té (Demir, I., 2006), cenizas de cáscara de arroz (Rahman, 1987), caucho molido (P. Turgut, 2008) y, por supuesto, alpeorujo (Cotes Palomino, Martínez García, Iglesias Godino, Eliche Quesada, & Corpas Iglesias, 2016), por nombrar algunos de ellos.

La utilización de cenizas volantes en la fabricación de ladrillos proporcionó una alta resistencia a la compresión, ausencia de agrietamiento debido a la cal, baja absorción de agua, alta solidez a la eflorescencia, ausencia de heladas y alta resistencia a la fusión por heladas. Sin embargo, esto también resultó en un aumento de la temperatura de sinterización y una reducción en la plasticidad de las mezclas. El uso de residuos de construcción y demolición en la fabricación de ladrillos resultó en mejoras en las pruebas de retracción y resistencia al deslizamiento, pero los niveles más altos de sustitución (> 40%) redujeron la resistencia a la compresión.

La inclusión de serrín de madera y residuos de algodón en la fabricación de ladrillos resultó en productos un 65% más ligeros, pero la resistencia a la compresión se vio comprometida. El polvo de mármol añadido en una proporción superior al 10% en peso aumentó la absorción de agua y disminuyó las propiedades mecánicas, pero la dureza de la

estructura del ladrillo se incrementó de forma paralela a la cantidad de polvo añadido. Se descubrió que la calcinación previa del polvo mejoraba las propiedades del producto final.

La incorporación de residuos de té aumentó la demanda de agua para la mezcla y actuó como agente generador de poros durante el proceso de sinterización. Los ladrillos aditivados con caucho presentaron mejores prestaciones de aislamiento térmico que los ladrillos ordinarios, con una mejora porcentual entre el 5% y el 11%, dependiendo de la cantidad de caucho utilizado. La inclusión de alpeorujó resultó en una microestructura más porosa, lo que redujo su peso y mejoró sus propiedades de aislamiento térmico y acústico. Sin embargo, la inclusión de más del 2,5% en peso del residuo produjo efectos negativos en las propiedades mecánicas de las muestras, que no cumplían con los requisitos de la legislación.

1.8.2 Áridos ligeros

El árido es un material granular utilizado en la construcción, cuyo origen puede ser natural, artificial o reciclado según lo definen las normas europeas, como la EN 13055-1 (UNE, 13055-1, 2003). Cabe señalar que limitar su uso en exclusiva en la construcción es poco acertado, ya que, aunque este sea su destino principal, la gama de aplicación de los áridos, y especialmente de los ligeros, es muy variada.

El árido es la segunda materia prima más consumida por el hombre después del agua, ya que su sector es el principal proveedor de materias primas para la construcción de infraestructuras y edificios, así como para la industria y la protección del medio ambiente, lo que le confiere un claro carácter estratégico, como puede apreciarse en la Figura 12 (ANEFA, 2022). Sin embargo, los áridos, no solo sirven para producir un material aglutinante, estos actúan como rellenos o componentes que aumentan el volumen, por un lado, y son responsables de la resistencia, dureza y durabilidad del hormigón, por el otro (CivilSeek, 2017).

El último informe sobre la producción minera mundial refleja que la producción primaria de áridos en Europa (*suma de arena, grava y roca triturada*), se estimó en 2.534 millones de toneladas en 2020, cifra coherente con la de años anteriores (Idoine, y otros, 2022). España, en la actualidad, ocupa el noveno lugar en Europa, frente al segundo puesto en 2006, en términos de producción total de áridos, por detrás de Rusia, Alemania, Turquía, Francia, Polonia, Reino Unido, Italia y Austria (FdA, 2019).

Cabe destacar que el consumo asociado a los áridos artificiales, donde se incluirían los áridos ligeros artificiales (*LWA*), representa tan solo el 0,7% (1 millón de toneladas en 2019), le superarían los reciclados con un valor de 1,8% (2,5 millones de toneladas) y, en cabeza con diferencia, los áridos naturales con un 97,5% de la producción (136,5 millones de toneladas), de acuerdo con los datos proporcionados por la FdA (FdA, 2019). Estas reducidas cifras manifiestan que el subsector de áridos ligeros artificiales apenas se encuentra

explotado en España, a pesar de sus fuertes ventajas tecnológicas sobre sus homólogos más pesados.

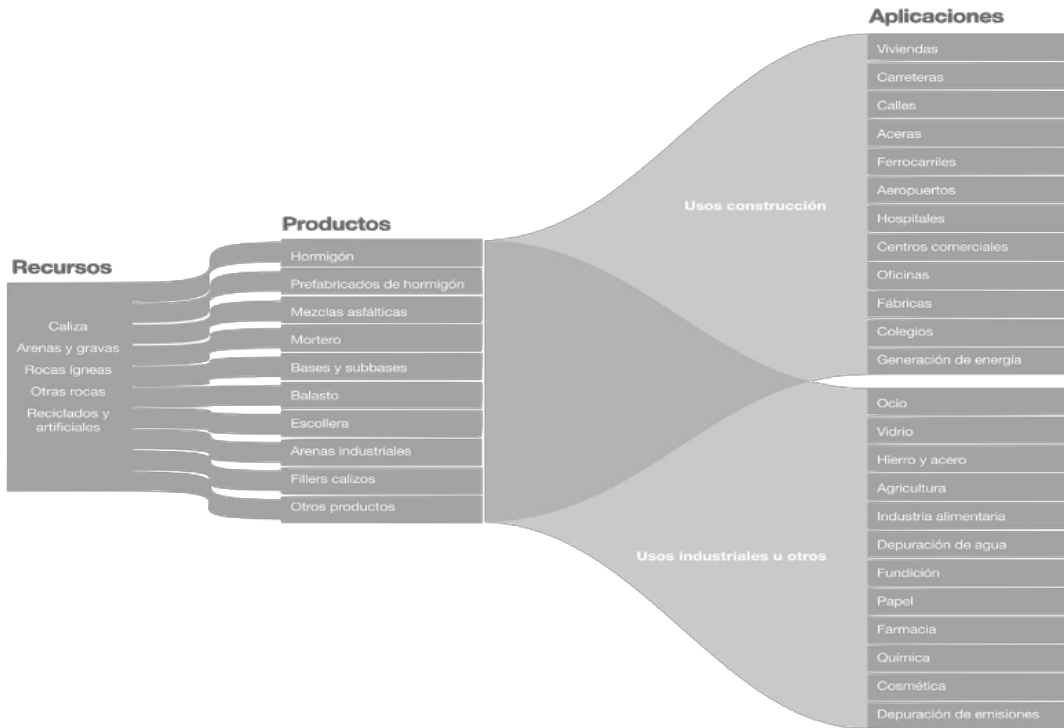


Figura 12. Materia prima, usos y aplicaciones de los áridos.

La baja densidad, la alta porosidad, el carácter inerte y la razonable resistencia mecánica de los áridos ligeros artificiales, hacen que sus aplicaciones se extiendan en multitud de campos (ESCSI, 2018): hormigón ligero (disminuyendo no solo su densidad, sino también favoreciendo el curado interior), mampostería, pavimentos, ingeniería geotécnica, tratamientos de aguas, cubiertas verdes u horticultura, entre otros. Por consiguiente, las ventajas significativas de los LWA deberían impulsar su producción en el futuro, por lo que se espera que el mercado crezca principalmente a medida que la demanda de hormigón ligero y aislante térmico aumente.

Según publicaciones recientes (Ayati, B., Ferrándiz-Mas, V., Newport, D, Cheeseman, C., 2018), las arcillas naturales y los residuos arcillosos son actualmente las materias primas más adecuadas para la producción de áridos ligeros artificiales debido a su alta disponibilidad cerca de las zonas urbanas y a sus características particulares. Así, la plasticidad de la arcilla jugaría un papel importante en el granulado, mientras que una composición química y un tamaño de partícula adecuados pueden llevar a que el granulado se expanda bajo ciertas condiciones de sinterización, normalmente por choque térmico, dando lugar a la estructura interna altamente porosa y de baja densidad (Riley, 1951;

Coungny, 1990). Moreno-Maroto et al. (2020) estudió los mecanismos de expansión y llegó a la conclusión de que la obtención de una viscosidad adecuada durante su permanencia en el punto álgido dentro del horno parece ser mucho más decisiva para la expansión que la capacidad de liberación de gas.

Dado el enorme potencial de los áridos ligeros artificiales en diversos sectores, las arcillas utilizadas hasta ahora en la cerámica tradicional (*como ladrillos y tejas*) pueden ser de interés para la producción de LWA. Obviamente, las características de los áridos sinterizados deben primar sobre el propio proceso de producción, que puede ser reajustado en caso necesario. La obtención de los áridos ligeros artificiales podría añadir valor a materias primas como la arcilla, consiguiendo de este modo, que su producción pudiera dar lugar a un impulso económico en regiones de cerámica tradicional, afectando no solo a dicho sector cerámico, sino también a otros en los que los LWA tiene una fuerte aplicación, como son los materiales de construcción, la agricultura o la ingeniería civil y medioambiental (Moreno Maroto, 2019).

El árido ligero, de manera general, corresponde a un material inorgánico granular redondo formado por un gran núcleo de alta porosidad que proporciona una baja densidad y una corteza más fina y estanca, de tal forma que existe una clara diferenciación entre la corteza y el núcleo, como se muestra en la Figura 13. Sin embargo, este modelo no es fijo, por lo que un material granular puede tener una estructura completamente diferente y seguir siendo considerado como árido ligero siempre y cuando cumpla con los requisitos reglamentarios establecidos.

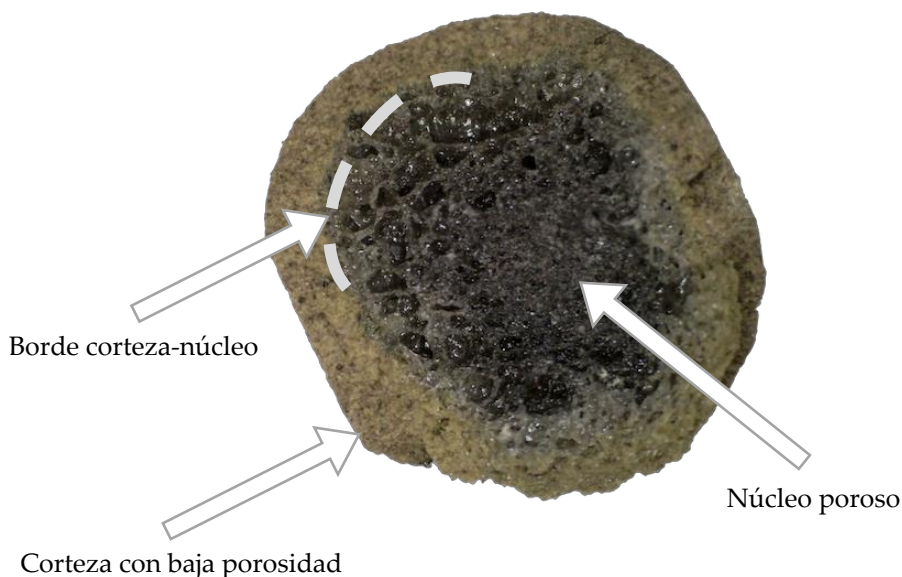


Figura 13. Sección transversal de un árido ligero.

Las propiedades requeridas por los áridos ligeros destinados a la fabricación de hormigón, mortero y lechada, así como para mezclas bituminosas, tratamientos superficiales y aplicaciones no ligadas y ligadas, respectivamente, vienen especificadas en las normas europeas EN 13055-1 (UNE, 13055-1, 2003) y EN 13055-2 (UNE, 13055-2, 2005). Si nos basamos en ellas, los áridos ligeros pueden definirse como aquellos áridos que presentan una densidad aparente (ρ_B) inferior a 1200 kg/m^3 o una densidad de partículas (ρ_A) inferior a 2000 kg/m^3 .

De acuerdo con estas normas, los LWA pueden clasificarse en función de su origen y tipo de procesamiento de la siguiente forma:

- *Árido natural*: Áridos de origen mineral (como *pedra pómez, perlita, toba o escoria volcánica y cenizas*) que solo han sido sometidos a procesos mecánicos (Nor, y otros, 2016; Dondi, y otros, 2016).
- *Subproductos obtenidos en procesos industriales*: Por ejemplo, las cenizas volantes de la combustión de carbón utilizadas como relleno ligero en el hormigón (Hanif, Lu, & Li).
- *Árido reciclado*: Áridos resultantes del tratamiento de materiales inorgánicos utilizados anteriormente en la construcción. Esta categoría comprende los áridos ligeros obtenidos por trituración y posterior clasificación por tamaño a partir de residuos de construcción y demolición (por ejemplo, *hormigón y pavimentos fuera de uso*).
- *Árido artificial*: Áridos de origen mineral resultantes de un proceso industrial que implique una transformación térmica u otra. Por lo tanto, incluiría tanto los áridos sintetizados artificialmente a partir de materiales naturales (como, *esquistos expandidos térmicamente, la arcilla, la pizarra o la vermiculita* (Nor, y otros, 2016; Dondi, y otros, 2016)), como los fabricados a partir de residuos y subproductos. Con respecto a este último, existe una amplia variedad de residuos que pueden ser reciclados en áridos ligeros como refleja la revisión bibliográfica elaborada por Dondi et al. (Dondi, y otros, 2016).

Actualmente, se están investigando una tipología de áridos distinta a los de origen mineral, y cuya naturaleza es principalmente orgánica. Estos se obtienen generalmente mediante el reciclaje de residuos vegetales, como los subproductos de la palma aceitera (Shafiqh, Jumaat, & Mahmud., 2010) o la cascarilla de arroz (Chabannes, Benezet, Clerc, & Garcia-Diaz, 2014), mientras que otros se valorizan a partir de materiales preparados sintéticamente, como el poliestireno expandido (Xu, Jiang, Xu, & Li, 2012). Del mismo modo que los áridos ligeros más tradicionales, la aplicación principal de este tipo de áridos se destina a la producción de hormigón ligero (Moreno Maroto, 2019).

REFERENCIAS

- AENOR. (2003). *Áridos ligeros. Parte 1: Áridos ligeros para hormigón, mortero e inyectado*. UNE Normalización Española.
- AENOR. (2005). *Áridos ligeros. Parte 2: Áridos ligeros para mezclas bituminosas, tratamientos superficiales y aplicaciones en capas tratadas y no tratadas*. UNE Normalización Española.
- Aeslina, A., Abbas, M., Felicity, R., & John, B. (2010). Density, strength, thermal conductivity and leachate characteristics of light weight fired clay bricks incorporating cigarette butts. *Int. J. Civ. Environ. Eng.*, 2(4), 179-184.
- AGAPA. (2015). *Evaluación de la producción y usos de los subproductos de las agroindustrias del olivar en Andalucía*. Unión Europea: Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural: Agencia de Gestión Agraria y Pesquera de Andalucía - Junta de Andalucía.
- Ahbe, S., Braunschweig, A., & Müller-Wenk, R. (1990). Methodik für Ökobilanzen auf der Basis ökologischer Optimierung. 133.
- Albritton, D., Derwent, R., Isaksen, I., Lal, M., & Wuebbles, D. (1995). Trace gas radioactive forcing indices. En J. Houghton, L. Meira Filho, B. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, & K. Maskell, *Climate change*. Cambridge University Press.
- Algin, H., & Turgut, P. (2008). Cotton and limestone powder wastes as brick material. *Constr. Build. Mater.*, 22(6), 1074-1080.
- Andersson-Sköld, Y., Grennfelt, P., & Pleijel, K. (1992). Photochemical ozone creation potentials: A study on different concepts. *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 42(9), 1152-1158.
- ANEFA. (2 de diciembre de 2022). *Asociación Nacional de Fabricantes de Áridos*. Obtenido de Áridos: <http://www.aridos.org/el-consumo-de-aridos-ve-frenada-su-fragil-recuperacion-en-2016/>
- Antonsson, A., & Carlsson, H. (1995). The basis for a method to integrate work environment in life cycle assessment. *J. Cleaner Prod.*, 3(4), 215-220.
- Arjona, R., García, A., & Ollero, P. (1999). The drying of alpeorujo, a waste product of the olive oil mill industry. *J. Food Eng.*, 41(3-4), 229-234.
- ASPAPEL. (s.f.). *Agenda sectorial industria papelera*. (Ministerio de economía, industria y competitividad) Recuperado el 19 de Agosto de 2019, de ASPAPEL: <http://www.aspapel.es/content/agenda-sectorial-industria-papelera>

- Astrup Jensen, A., Hoffman, L., Møller, B., Schmidt, A., Christiansen, K., Elkington, J., & van Dijk, F. (1997). Life Cycle Assessment (LCA): A guide to approaches, experiences and information sources. *Environmental Issues Series*, 6.
- Ayati, B., Ferrándiz-Mas, V., Newport, D., Cheeseman, C. (2018). Use of clay in the manufacture of lightweight aggregate. *162*, 124–131.
- Bare, J., Hofstetter, P., Pennington, D., & Udo de Haes, H. (2000). Life cycle impact assessment midpoints vs. endpoints: the sacrifices and the benefits. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 5(5), 319-326.
- Bare, J., Norris, G., Pennington, D., & McKone, T. (2002). TRACI, the Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts. *J. Ind. Ecol.*, 6(3-4), 49-78.
- Bas, S. (26 de Julio de 2017). *El corcho*. Recuperado el 19 de Agosto de 2019, de GM cash: <https://www.grosmercat.es/blog/el-corcho>
- Bengtsson, G., & Berglund, R. (1996). *Life cycle assessment including the working environment*. The Swedish Institute of Production Engineering Research, IVF.: Summary of methods and case studies. IVF research publication 95859.
- Bergaya, F., & Lagaly, G. (2006). Chapter 1 General Introduction: Clays, Clay Minerals, and Clay Science. *Developments in Clay Science*, 1, 1-18.
- Bilgin, N., Yeprem, H., Arslan, S., Bilgin, A., Günay, E., & Marsoglu, M. (2012). Use of waste marble powder in brick industry. *Constr. Build. Mater.*, 29, 449-457.
- Bjørnsen, J., Hanssen, O., & Møller, H. (1995). *Life cycle assessment of a mud gas separator for offshore operations*. Sandefjord, Noruega: AMAT AS.
- Bravo, J., Juárez, I., Monente, C., Caemmerer, B., Kroh, L., De Peña, M., & Concepción Cid, C. (2012). Evaluation of Spent Coffee Obtained from the Most Common Coffeemakers as a Source of Hydrophilic Bioactive Compounds. *J. Agric. Food Chem.*, 60(51), 12565-12573.
- Bubalo, A., Vouk, D., Stirmer, N., & Nad, K. (2021). Use of Sewage Sludge Ash in the Production of Innovative Bricks – An Example of a Circular Economy. *Sustainability*, 13(6), 9330.
- Bundesamt für Umweltschutz (BUS). (1984). *Ökobilanzen von Packstoffen*. Bern: Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 24.
- BUS. (1984). *Oekobilanzen von Packstoffen*. *Schriftenreihe Umweltschutz*, Nr. 24. Bern: Bundesamt für Umweltschutz.

- Calkins, M. (2008). *Materials for Sustainable Sites: A Complete Guide to the Evaluation, Selection, and Use of Sustainable Construction Materials*. NJ, Estados Unidos: Brick Masonry; John Wiley and Sons.
- Cao, L., Diana, J., Keoleian, G., & Lai, Q. (2011). Life Cycle Assessment of Chinese Shrimp Farming Systems Targeted for Export and Domestic Sales. *Environ. Sci. Technol.*, 45(15), 6531–6538.
- Cao, L.; Diana, J.S.; Keoleian, G.A. (2013). Role of life cycle assessment in sustainable aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 5(2), 61-71.
- CELSUR. (s.f.). *Inicio*. Recuperado el 19 de Agosto de 2019, de celsur: <http://www.celsur.es/es/index.html>
- Chabannes, M., Benezet, J., Clerc, L., & Garcia-Diaz, E. (2014). Use of raw rice husk as natural aggregate in a lightweight insulating concrete: An innovative application. *Constr. Build. Mater.*, 70, 428-438.
- Christiansen, K., Grove, A., Hansen, L., Hoffmann, L., Jensen, A., Pommer, K., & Schmidt, A. (1993). *PVC and alternative materials. Working Report no. 18*. Copenhagen: Danish Environmental Protection Agency.
- CivilSeek. (17 de Diciembre de 2017). *What is Aggregates | Aggregate Definition & its Types*. Recuperado el 4 de Agosto de 2019, de CivilSeek: <https://civilseek.com/aggregate-definition-aggregates-types/>
- COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS. (2001). *LIBRO VERDE*. Bruselas: COM(2001) 366 final.
- Consoli, F., Allen, D., Boustead, I., Fava, J., Franklin, W., Jensen, A., . . . Vigon, B. (1993). Guidelines for Life-cycle assessment: A “Code of practice”. SETAC Workshop, Sesimbra, Portugal: Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC).
- Cotes Palomino, M., Martínez García, C., Iglesias Godino, F., Eliche Quesada, D., & Corpas Iglesias, F. (2016). Study of the wet pomace as an additive in ceramic material. *Desalin. Water Treat.*, 57(6), 2712-2718.
- Coungny, G. (1990). Specifications for clayey raw materials used to produce expanded lightweight aggregates. 41, 47–55.
- Curran, M. (2006). *Life-cycle assessment: Principles and practice*. Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, Estados Unidos.

- De la Casa, J., Romero, I., Jiménez, J., & Castro, E. (2012). Fired clay masonry units production incorporating two-phase olive mill waste (alperujo). *Ceram. Int.*, 38(6), 5027-5037.
- De Wolf, C., & Mauro Cordella, N. (2020). *Criteria for analysis of LCA software tools and databases for buildings – DRAFT 4.1*. Directorate B, Growth and Innovation, Unit 5, Circular Economy and Industrial Leadership. Sevilla: European Commission. Obtenido de https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2021-10/UM3_Indicators_1-2_list_of_LCA_software_databases_v4.1.pdf
- Demir, I. (2006). An investigation on the production of construction brick with processed waste tea. *Build. Environ.*, 41, 1274-1278.
- Demir, I., Baspinar, M., & Orhan, M. (2005). Utilization of kraft pulp production residues in clay brick production. *Build. Environ.*, 4, 1533-1537.
- Dondi, M., Cappelletti, P., D'Amore, M., de Gennaro, R., Graziano, S., Langella, A., . . . Zanelli, C. (30 de noviembre de 2016). Lightweight aggregates from waste materials: Reappraisal of expansion behavior and prediction schemes for bloating. *Construction and Building Materials*, 127, 394–409.
- Dreyer, L., Niemann, A., & Hauschild, M. (2003). Comparison of three different LCIA methods: EDIP97, CML2001 and eco-indicator 99. Does it matter which one you choose? *Int. J. Life Cycle Assess.*, 8(4), 191-200.
- Earth Sciences department. (27 de Enero de 2016). *University College London Geology on Campus: Clays*. Recuperado el 2019 de Agosto de 19, de University College London: <https://web.archive.org/web/20160127051002/https://www.ucl.ac.uk/earth-sciences/impact/geology/london/ucl/materials/clay>
- Eastern Research Group, Inc. (s.f.). *FRANKLIN Associates*. Recuperado el 15 de julio de 2019, de A Division of ERG: <http://fal.com>
- ecoinvent. (s.f.). *Ecoinvent*. Recuperado el 4 de Agosto de 2019, de ecoinvent: <https://www.ecoinvent.org>
- EEC. (1993). *Adapting to technical progress for the 18th time Council Directive 67/548/EEC on the approximation of the laws, regulations and administrative provisions relating to the classification, packaging and labelling of dangerous substances (93/21/EEC)*. Commission Directive of 27 April 1993.
- EFE. (22 de Mayo de 2012). *Una empresa de Reus aprovecha las cáscaras de avellanas y almendras farmacia*. Recuperado el 19 de Agosto de 2019, de ABC: <https://agencias.abc.es/agencias/noticia.asp?noticia=1173641>

- Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. (s.f.). *Portada*. Recuperado el 18 de Mayo de 2019, de ETH zürich: <https://www.ethz.ch/de.html>
- Elías Castells, X. (2005). Aspectos ambientales de la valorización cerámica de fangos de EDAR (II). *Residuos: Revista técnica*, 84, 90-106.
- ESCSI. (2018). *Applications*. Recuperado el Mayo de 2019, de Expanded Shale, Clay and Slate Institute: <https://www.escsi.org/applications/>
- Eurotapón Núñez, S.L. (s.f.). *Inicio*. Recuperado el 19 de Agosto de 2019, de Eurotapón Núñez, S.L. - Tapones de Corcho Aglomerado: <http://www.eurotapon-nunez.com>
- Faculteit Industrieel Ontwerpen. (s.f.). *Faculty of Industrial Design Engineering*. Recuperado el 15 de julio de 2019, de <https://www.tudelft.nl/io/>
- FdA. (2019). *El sector de los áridos en 2019 y perspectivas 2020*. Recuperado el 11 de abril de 2023, de Federación de Áridos: <https://aridos.info/el-sector-de-los-aridos-en-2019-y-perspectivas-2020/>
- Finnveden, G. (1996). Part III: "Resources" and related impact categories. En H. Udo de Haes, *Towards a methodology for life cycle impact assessment*. Bruselas: Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) - Europe.
- Finnveden, G., Andersson-Sköld, Y., Samuelsson, M., Zetterberg, L., & Lindfors, L. (s.f.). *Classification (impact analysis) in connection with life cycle assessments - a preliminary study*. Copenhagen: Nordic Council of Ministers.
- Franke, M. (1984). *Umweltauswirkungen durch Getränkeverpackungen – Systematik zur Ermittlung der Umweltauswirkungen von komplexen Prozessen am Beispiel von Einweg- und Mehrweg-Getränkebehältern*. Berlin: Technische Universität Berlin, Institut für Technischen Umweltschutz.
- Freyburg, S., & Schwarz, A. (2007). Influence of the clay type on the pore structure of structural ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 27((2-3)), 1727-1733.
- Gobierno de España. (2002). *LISTA EUROPEA DE RESIDUOS, Anejo 2 de la Orden MAM/304/2002*. Madrid: Boletín Oficial del Estado.
- Goedkoop, M., & Spriensma, R. (2000). *Eco-indicator 99, a damage oriented method for life cycle impact assessment, methodology report (update April 2000) (3ª edición ed.)*. (M. o. Housing, Ed.) The Netherlands: Spatial planning and the Environment.
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & van Zelm, R. (2009). *ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level (1ª Edición ed.)*. The Netherlands: Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM).

- Gorrée, M., Heijungs, R., Huppés, G., Kleijn, R., Koning, A. d., Suh, S., . . . Huijbregts, M. (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to the ISO Standards* (1ª Edición ed.). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Guggenheim, S., & Martin, R. (1995). Definition of clay and clay mineral: Journal report of the AIPEA nomenclature and CMS nomenclature committees. *Clays and Clay Minerals*, 30(3), 257-259.
- Guinée, J., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppés, G., Kleijn, R., Koning, A. d., . . . Huijbregts, M. (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards. Series: Eco-efficiency in industry and science*. Dordrecht, Hardbound: Kluwer Academic Publishers.
- Guinée, J., Heijungs, R., Oers, L. v., Meent, D. v., Vermeire, T., & Rikken, M. (1996). LCA impact assessment of toxic releases. Generic modelling of fate, exposure and effect for ecosystems and human beings with data for about 100 chemicals. 1 - 100.
- Guinée, J.B.; Heijungs, R. (1993). A proposal for the classification of toxic substances within the framework of LCA of products. *Chemosphere*, 26(10), 1925-1944.
- Guzlena, S., Sakale, G., Certoks, S., & Grase, L. (2019). Sand size particle amount influence on the full brick quality and technical properties. *Construction and Building Materials*, 220, 102-109.
- Habersatter, K. (1991). *Oekobilanz von Packstoffen Stand 1990*. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL): Schriftenreihe Umwelt Nr. 132.
- Hanif, A., Lu, Z., & Li, Z. (s.f.). Utilization of fly ash cenosphere as lightweight filler in cement-based composites – A review. *Constr. Build. Mater.*, 144(30), 373-384.
- Hauschild, M., & Huijbregts, M. (2015). *Life Cycle Impact Assessment*. Springer.
- Hauschild, M., & Potting, J. (2005). Spatial differentiation in Life Cycle impact assessment - The EDIP2003 methodology. (E. P. The Danish Ministry of the Environment, Ed.) 80.
- Hauschild, M., & Wenzel, H. (1997). Acidification as assessment criteria in the EDIP-method. En M. Hauschild, & H. Wenzel, *Scientific background*. Londres: Chapman & Hall.
- Hauschild, M., & Wenzel, H. (1997). Global warming as assessment criteria in the EDIP-method. En M. Hauschild, & H. Wenzel, *Scientific background*. Londres: Chapman & Hall.

- Hauschild, M., & Wenzel, H. (1997). Nutrient enrichment as assessment criteria in the EDIP-method. En M. Hauschild, & H. Wenzel, *Scientific background*. Londres: Chapman & Hall.
- Hauschild, M., & Wenzel, H. (1997). Photochemical ozone formation as assessment criteria in the EDIP-method. En M. Hauschild, & H. Wenzel, *Scientific background*. Londres: Chapman & Hall.
- Hauschild, M., Goedkoop, M., Guinée, J., Heijungs, R., Huijbregts, M., Jolliet, O., . . . Pant, R. (2013). Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 18(3), 683-697.
- Hauschild, M., Huijbregts, M., Jolliet, O., MacLeod, M., Margni, M., van de Meent, D., . . . McKone, T. (2008). Building a model based on scientific consensus for Life Cycle Impact Assessment of chemicals: the search for harmony and parsimony. *Environ. Sci. Technol.*, 42(9), 7032-7037.
- Hauschild, M., Olsen, S., & Wenzel, H. (1997). Human toxicity as assessment criteria in the EDIP-method. En M. Hauschild, & H. Wenzel, *Scientific background*. Londres: Chapman & Hall.
- Hauschild, M.Z.; Wenzel, H. (1997). Stratospheric ozone depletion as assessment criteria in the EDIP-method. En M. Hauschild, & H. Wenzel, *Scientific background*. Londres: Chapman & Hall.
- Heijungs, R., Guinée, J., Huppes, G., Lankreijer, R., Udo de Haes, H., Wegener Sleswijk, A., . . . Goede, H. d. (1992). Environmental life cycle assessment of products: guide and backgrounds (Part 1).
- Heijungs, R.; Hofstetter, P. (1996). Part II: Definitions of terms and symbols. En H. Udo de Haes, *Towards a methodology for life cycle assessment* (págs. 31-37). Brussels: Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) - Europe.
- Herrmann, I., Jørgensen, A., Bruun, S., & Hauschild, M. (2013). Potential for optimized production and use of rapeseed biodiesel. Based on a comprehensive real-time LCA case study in Denmark with multiple pathways. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 18(2), 418-430.
- HISPALYT. (12 de diciembre de 2022). *Hispalyt: Productos Cerámicos - Fabricantes de Ladrillo*. Obtenido de <http://www.hispalyt.es/es>
- Hunt, R., Franklin, W., Welch, R., Cross, J., & Woodall, A. (1974). *Resource and environmental profile analysis of nine beverage container alternatives*. (U. S. EPA, Ed.) Washington, D.C.: Office of Solid Waste Management Programs.

- Huppel, G., & Curran, M. (2012). Environmental life cycle assessment: background and perspective. En N. U. Mary Ann Curran. Hoboken (Ed.), *Life Cycle Assessment Handbook: A Guide for Environmentally Sustainable Products* (Vols. Life cycle assessment handbook – A guide for environmentally sustainable products). Scrivener Publishing, Salem, M.A., y Wiley, Hoboken.
- HZZK. (2019). *The Brick Industry Worldwide*. Recuperado el 11 de abril de 2023, de Habla Zig-Zag Kilns: <https://hablakilns.com/the-brick-industry/the-brick-market/>
- Idoine, N., Raycraft, E., Shaw, R., Hobbs, S., Deady, E., Everett, P., . . . Mills, A. (2022). *World Mineral Production 2016-2020*. British Geological Survey. Natural Environmental Research Council.
- ism. (2018). Herramienta de Software para ACV. En I. s. ambiente, *Metodología de Análisis de Ciclo de Vida*.
- ISO. (1997). 14040. *Environmental management – life cycle assessment – principles and framework*. Geneva: International Standards Organization.
- ISO. (1998). 14041. *Environmental management – life cycle assessment – goal and scope definition and inventory analysis*. Geneva: International Standards Organization.
- ISO. (2000). 14042. *Environmental management – life cycle assessment – life cycle impact assessment*. Geneva: International Standards Organization.
- ISO. (2000). 14043. *Environmental management – life cycle assessment – life cycle interpretation*. Geneva: International Standards Organization.
- ISO. (2006). 14040. *Environmental management – life cycle assessment – principles and framework*. Geneva: International Standards Organization.
- ISO. (2006). 14044. *Environmental management – life cycle assessment requirements and guidelines*. Geneva: International Standards Organization.
- Itsubo, N., Sakagami, M., Washida, T., Kokubu, K., & Inaba, A. (2004). Weighting across safeguard subjects for LCIA through the application of conjoint analysis. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 9, 196-205.
- IVAM. (s.f.). IVAM. Obtenido de <https://www.ivam.uva.nl>
- Jelnes, J.E.; Schmidt, A.; Wilhardt, P. (1994). Screening for potentielle sundhedseffekter. Kapitel 6. En A. Schmidt, K. Christiansen, & K. Pommer, *Livscyklusmodel til vurdering af nye materialer. Metoder, vurderingsgrundlag og fremgangsmåde*. Søborg: dk-TEKNIK: Det Materiale teknologiske Udviklingsprogram, Rammeprogrammet for integrerede miljø- og arbejdsmiljøvurderinger.

- Jensen, O., Schmidt, A., & Jensen, A. (1994). Screening for potentielle miljøeffekter. Kapitel 7. En A. Schmidt, K. Christiansen, & K. Pommer, *Livscyklusmodel til vurdering af nye materialer. Metoder, vurderingsgrundlag og fremgangsmåde*. Søborg: dk-TEKNIK: Det Materiale teknologiske Udviklingsprogram, Rammeprogrammet for integrerede miljø- og arbejdsmiljøvurderinger.
- Jewell, S., & Kimball, S. (2015). Mineral commodity summaries. *USA Geol. Surv.*, 9, 196.
- Johnson Alengaram, U., Abdullah Al Muhit, B., & M., Z. b. (enero de 2013). Utilization of oil palm kernel shell as lightweight aggregate in concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 38, 161–172.
- Jolliet, O. (1994). A structure of impact assessment for LCA: Impact category and serial/parallel impacts. Zürich: SETAC Impact assessment workshop Zürich.
- Jolliet, O. (1994). Critical surface-time: an evaluation method for life cycle assessment. *Integrating impact assessment into LCA*, págs. 133-142.
- Jolliet, O., Frischknecht, R., Bare, J., Boulay, A., Bulle, C., Fantke, P., . . . Seager, T. (2014). Global guidance on environmental life cycle impact assessment indicators: findings of the scoping phase. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 19(4), 962-967.
- Jolliet, O., Zabalza, I., Aranda, A., Scarpellini, S., Margni, M., Charles, R., . . . Rosenbaum, R. (2003). IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 8(6), 324-330.
- Jolliet, O.; Crettaz, P. (1996). Critical surface-time 95, a life cycle impact assessment methodology, including exposure and fate. Lyngby, Dinamarca: Presented at the workshop of the EU concerted action on harmonization of life cycle assessment in agriculture.
- Klöppfer, W. (2006). The Role of SETAC in the Development of LCA. *11(1)*, 116-122.
- Lindeijer, E. (1996). Part VI: Normalisation and valuation. En H. Udo de Haes, *Towards a methodology for life cycle impact assessment*. Brussels: Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) - Europe.
- Lindfors, L., Christiansen, K., Hoffmann, L., Virtanen, Y., Juntilla, V., Hanssen, O., . . . Finnveden, G. (1995). *LCA- Nordic. Technical Reports No. 1 - 9*. Copenhagen: Nordic Council of Ministers.
- Lindfors, L., Christiansen, K., Hoffmann, L., Virtanen, Y., Juntilla, V., Hanssen, O., . . . Finnveden, G. (1995). *Nord 1995:20: Nordic guidelines on life-cycle assessment*. Copenhagen: Nordic Council of Ministers.

- Lingling, X., Wei, G., Tao, W., & Nanru, Y. (2005). Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio. *Constr. Build. Mater.*, 9, 243-247.
- Lundholm, M., & Sundström, G. (1985). *Resource and environmental impact of Tetra Brik carton and refillable and non-refillable glass bottles, Tetra Brik aseptic environmental profile*. Malmö: AB Tetra Pak.
- López-García, A., Uceda-Rodríguez, M., León-Gutiérrez, S., Cobo-Ceacero, C., & Moreno-Maroto, J. (2022). Eco-efficient transformation of mineral wool wastes into lightweight aggregates at low firing temperature and associated environmental assessment. *Construction and Building Materials*, 345, 128294.
- Møller, J., Førde, J., Vold, M., & Hanssen, O. (1995). *Environmentally sound product development of sports underwear. Project Report OR.41.95*. Frederikstad, Noruega: Østfold Research Foundation.
- Møller, S., & Schmidt, A. (1994). Råstofforbrug. Kapitel 2 . . En A. Schmidt, K. Christiansen, & K. Pommer, *Livscyklusmodel til vurdering af nye materialer. Metoder, vurderingsgrundlag og fremgangsmåde*. Søborg: dk-TEKNIK: Det Materiale teknologiske Udviklingsprogram, Rammeprogrammet for integrerede miljø .
- (2014). *Manifiesto de Barcelona*. Barcelona: Conferencia Mundial de Edificios Sostenibles.
- Margni, M., Gloria, T., Bare, J., Seppälä, J., Steen, B., Struijs, J., . . . Jolliet, O. (2007). *Guidance on how to move from current practice to recommended practice in life cycle impact assessment: UNEP/SETAC Life Cycle Initiative*.
- Molina Sampedro, L. (2018). *Lodos de depuración de aguas residuales para la obtención de materiales sostenibles en construcción* . Linares: TFM del Departamento de Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales. Universidad de Jaén.
- Moreno Maroto, J. (2019). *Development of high performance ceramic lightweight aggregates by recycling carbon fiber, plastic and mineral wastes: innovations in materials, methods and technological applications*. Toledo: Universidad de Castilla-La Mancha.
- Moreno-Maroto, J., Cobo-Ceacero, C., Uceda-Rodríguez, M., Cotes-Palomino, T., Martínez García, C., & Alonso-Azcárate, J. (30 de junio de 2020). Unraveling the expansion mechanism in lightweight aggregates: Demonstrating that bloating barely requires gas. *Construction and Building Materials*, 247, 118583.
- Moreno-Maroto, J., González-Corrochano, B., Alonso-Azcárate, J., Rodríguez, L., & Acosta, A. (octubre de 2017). Manufacturing of lightweight aggregates with carbon fiber and mineral wastes. *Cement and Concrete Composites*, 83, 335–348.

- Moreno-Maroto, J., Uceda-Rodríguez, M., Cobo-Ceacero, C., Calero de Hocés, M., Martín Lara, M., Cotes-Palomino, T., . . . Martínez García, C. (2019). Recycling of 'alperujo' (olive pomace) as a key component in the sintering of lightweight aggregates. *J. Cleaner Prod., JCLP 118041*.
- Muñoz, P., Morales, M., Mendivil, M., & Muñoz, L. (2014, julio 30). Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material – A review. *Construction and Building Materials, 63*, 97–107.
- Murmu, A., & Patel, A. (20 de marzo de 2018). Towards sustainable bricks production: An overview. *Construction and Building Materials, 165*, 112–125.
- Netinger, I., Vračević, M., & Bačkalić, Z. (2014). *Opeka-od Sirovine do Gotovog Proizvoda (Clay Brick-From Raw Material to Final Product)*. Osijek, Hrvatska: Sveuciliste Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.
- Nichols, P., Hauschild, M., Potting, J., & White, P. (1996). Part V: Impact assessment of non toxic pollution in life cycle assessment. En U. d. Haes, *Towards a methodology for life cycle impact assessment*. Bruselas: Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) - Europe.
- Nor, A., Yahya, Z., Abdullah, M., Razak, R., Ekaputri, J., Faris, M., & Hamzah, H. (2016). A Review on the manufacturing of lightweight aggregates using industrial by-product. *2nd International Conference on Green Desing and Manufacture (IConGDM)*. Phuket, Tailandia.
- P. Turgut, B. Y. (2008). Physico-mechanical and thermal performances of newly develop rubber-added bricks. *Energy Build., 40*, 679-688.
- Pant, R., Van Hoof, G., Schowanek, D., Feijtel, T., de Koning, A., Hauschild, M., . . . Rosenbaum, R. (2004). Comparison between three different LCIA methods for aquatic ecotoxicity and a product environmental risk assessment – insights from a detergent case study within OMNIITOX. *Int. J. Life Cycle Assess., 9(5)*, 295-306.
- Pedersen, F., Tyle, H., Niemelä, J., Guttmann, B., Lander, L., & Wedebrand, A. (1995). *Environmental hazard classification. Data collection and interpretation guide for substances to be evaluated for classification as dangerous for the environment* (2ª Edición ed.). Copenhagen: Nordic Council of Ministers.
- Peuportier, B., Scarpellini, S., Glaumann, M., Malmqvist, T., Krigsvol, G., Wetzels, C., . . . Stoykova, E. (2007). *ENSLIC_BUILDING : Energy Saving through Promotion of Life Cycle Assessment in Buildings*. Zaragoza: Fundación CIRCE - Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos.
- PlasticsEurope. (s.f.). *PlasticsEurope: Productores de Materias Plásticas*. Recuperado el 15 de julio de 2019, de <https://www.plasticseurope.org/es>

- Poon, C., Kou, S., & Lam, L. (2002). Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. *Constr. Build. Mater.*, 16, 281-289.
- Potting, J., Møller, B., & Jensen, A. (1997). *Work environment and LCA*. LCANET Theme Report.
- PRÉ Consultants (Product Ecology consultants). (s.f.). *PRÉ: Putting the metrics behind sustainability*. Recuperado el 29 de noviembre de 2018, de <https://www.pre-sustainability.com>
- Production, M. B. (abril de 2015). CCAC. Recuperado el 6 de diciembre de 2022, de Breathelife2030: <https://breathelife2030.org/wp-content/uploads/2016/09/Fact-Sheet-5-Bricks-FINAL-Digital-May2015.pdf>
- Pyle, J., Wuebbles, D., Solomon, S., & Zvenigorodsky, S. (1991). Ozone depletion and chlorine loading potentials. Ginebra: World Meteorological Organisation: Scientific assessment of stratospheric ozone: 1991 Global ozone research and monitoring project. Report no. 25.
- Quina, M., Rita Garcia, R., Simões, A., & Quinta-Ferreira, R. (2020). Life cycle assessment of lightweight aggregates produced with ashes from municipal solid waste incineration. *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, 22, 1922–1931.
- Rønning, A., Hanssen, O., & Møller, H. (1995). *Environmentally sound product development of offshore coatings*. Frederikstad, Noruega: Østfold Research Foundation.
- Rübner, K., & Hoffmann, D. (2006). Characterization of Mineral Building Materials by Mercury-Intrusion Porosimetry. *Part. Part. Syst. Char.*, 23(1), 20-28.
- Rahman, M. (1987). Properties of clay–sand–rice husk ash mixed bricks. *Int. J. Cem. Compos Lightweight Concr.*, 9(2), 105-108.
- Rasmussen, E. (1997). Working environment as assessment criteria in the EDIP method. En M. Hauschild, & H. Wenzel, *Scientific background*. Londres: Chapman & Hall.
- Riley, C. (1951). Relation of chemical properties to the bloating of clays. 34(4), 121–128.
- Robayo-Salazar, R., Mejía de Gutiérrez, R., & Mulford-Carvajal, A. (2016). Production of building elements based on alkali-activated red clay brick waste. *Revista Facultad de Ingeniería*, 25(43), 21–30.
- Rosenbaum, R., Bachmann, T., Gold, L., Huijbregts, M., Jolliet, O., Juraske, R., . . . Hauschild, M. (2008). USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 13(532).

- Schmidt, A., Drabæk, I., & Midtgaard, U. (1994). *Integrated environmental and occupational assessment of new materials - the Danish Materials Technology Programme (MUP)*. Copenhagen: National Institute of Occupational Health.
- Schweizerisches Verpackungsinstitut SVI. (s.f.). *Publikationen*. Recuperado el 15 de julio de 2019, de SVI: <https://www.svi-verpackung.ch/de/Services/Publikationen>
- Science Learning Hub. (3 de Enero de 2016). *What is clay?* Recuperado el 19 de Agosto de 2019, de University of Waikato: <https://web.archive.org/web/20160103182308/http://sciencelearn.org.nz/Contexts/Ceramics/Science-Ideas-and-Concepts/What-is-clay>
- Sengupta, P., Saikia, N., & Borthakur, P. (2002). Bricks from petroleum effluent treatment plant sludge: properties and environmental characteristics. *J. Environ. Eng.*, 128(11), 1090-1094.
- SETAC-Europe. (1992). *Life-cycle assessment. LCA Workshop, Leiden 2-3 December 1991*. Brussels: Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) - Europe.
- Shafigh, P., Jumaat, M., & Mahmud., H. (2010). Mix design and mechanical properties of oil palm shell lightweight aggregate concrete: A review. *Int. J. Phys. Sci.*, 5(14), 2127-2134.
- Singh, N., Mithulraj, M., & Arya, S. (noviembre de 2018). Influence of coal bottom ash as fine aggregates replacement on various properties of concretes: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 138, 257-271.
- Solomon, S., & Wuebbles, D. (1994). Ozone depletion potentials, global warming potentials and future chlorine/bromine loading. En D. Albritton, R. Watson, & P. Aucamp, *Scientific assessment of ozone depletion*. Ginebra: WMO: World Meteorological Organisation, Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 37.
- Spadaro, J., & Rabl, A. (2002). Air pollution damage estimates: the cost per kilogram of pollutant. *Int. J. Risk Assess. Manage.*, 3(1), 75-98.
- SPOLD. (1996). *SPOLD data format*. Brussels: Society for the Promotion of LCA Development (SPOLD).
- Steen, B. (1999a). *A Systematic Approach to Environmental Priority Strategies in In Product Development (EPS). Version 2000 – General System Characteristics*. Gothenburg: Chalmers University of Technology, Centre for Environmental Assessment of Products and material Systems (CPM) Report 1999:4.
- Steen, B. (1999b). *A Systematic Approach to Environmental Priority Strategies in In Product Development (EPS). Version 2000 – Models and Data*. Gothenburg: Chalmers

University of Technology, Centre for Environmental Assessment of Products and material Systems (CPM) Report 1999:5.

Sutcu, M., & Akkurt, S. (2009). The use of recycled paper processing residue in making porous brick with reduced thermal conductivity. *Ceram. Int.*, 35, 2625-2631.

Tellus Institute. (1992). *Inicio*. (The Tellus Packaging Study. Boston, MA, USA) Recuperado el 23 de Agosto de 2019, de Tellus Institute: <https://www.tellus.org>

Terwoert, J. (1994). *Occupational health from cradle to grave. Feasibility study of the integration of the work environment in Life Cycle Assessment (LCA's) of products*. Países Bajos: Chemiewinkel of the University of Amsterdam.

Terwoert, J. (1994). *Proceedings of the Workshop Life Cycle Assessment and the Working Environment*. Países Bajos: Chemiewinkel of the University of Amsterdam.

Terwoert, J. (1994). *Workshop paper Life Cycle Assessment and the Working Environment*. Países Bajos: Chemiewinkel of the University of Amsterdam.

Toffoletto, L., Bulle, C., Godin, J., Reid, C., & Deschênes, L. (2007). LUCAS – A New LCIA Method Used for a Canadian-Specific Context. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 12(2), 93-102.

Tugrul Tunc, E. (1 de febrero de 2019). Recycling of marble waste: A review based on strength of concrete containing marble waste. *Journal of Environmental Management*, 231, 86–97.

Turgut, P., & Algin, H. (2007). Limestone dust and wood sawdust as brick material. *Build. Environ.*, 42, 3399-3403.

Uceda-Rodríguez, M., López-García, A., Moreno-Maroto, J., Cobo-Ceacero, C., Cotes-Palomino, M., & Martínez García, C. (2020). Evaluation of the Environmental Benefits Associated with the Addition of Olive Pomace in the Manufacture of Lightweight Aggregates. *Materials*, 13, 2351.

Uceda-Rodríguez, M., Moreno-Maroto, J., Cobo-Ceacero, C., López-García, A., Cotes-Palomino, T., & Martínez-García, C. (2022). Comparative Life Cycle Assessment of Lightweight Aggregates Made from Waste—Applying the Circular Economy. *Appl. Sci.*, 12, 1917.

Udo de Haes, H. (1996). Part I: Discussion of general principles and guidelines for practical use. En H. Udo de Haes, *Towards a methodology for life cycle impact assessment*. Brussels: Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) - Europe.

Udo de Haes, H. (1996). *Towards a methodology for life cycle impact assessment*. Brussels: Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) - Europe.

- Udo de Haes, H., Finnveden, G., Goedkoop, M., Hauschild, M., Hertwich, E., Hofstetter, P., . . . Steen, B. (2002). *Life-Cycle Impact Assessment: Striving towards Best Practice*. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). Pensacola (US): SETAC Press.
- UNAV. (10 de Enero de 2013). *Una investigación de la Universidad de Navarra concluye que los posos del café son una fuente rica en antioxidantes*. (Universidad de Navarra) Recuperado el 19 de Agosto de 2019, de vida universitaria: <https://www.unav.edu/web/vida-universitaria/detalle-noticia-pestana/2013/01/10/una-investigacion-de-la-universidad-de-navarra-concluye-que-los-posos-del-cafe-son-una-fuente-rica-en-antioxidantes?articleId=1856837>
- UNE. (2003). 13055-1. *Áridos ligeros. Parte 1: Áridos ligeros para hormigón, mortero e inyectado*. España: AENOR.
- UNE. (2005). 13055-2. *Áridos ligeros. Parte 2: Áridos ligeros para mezclas bituminosas, tratamientos superficiales y aplicaciones en capas tratadas y no tratadas*. AENOR.
- University of Leiden. (s.f.). *Institute of environmental sciences (CML)*. Recuperado el 25 de Noviembre de 2018, de Universiteit Leiden: <https://www.universiteitleiden.nl/en/science/environmental-sciences>
- Väntsi, O., & Kärki, T. (2014). Mineral wool waste in Europe: a review of mineral wool waste quantity, quality, and current recycling methods. *Journal of Materials Cycles and Waste Management*, 16, 62-72.
- Vasić, M., Pezo, L., & Radojević, Z. (30 de mayo de 2020). Optimization of adobe clay bricks based on the raw material properties (mathematical analysis). *Construction and Building Materials*, 244, 118342.
- Vasic, M., Pezo, L., Zdravkovic, J., Backalic, Z., & Radojevic, Z. (2017). The study of thermal behavior of montmorillonite and hydromica brick clays in predicting tunnel kiln firing curve. *Construction and Building Materials*, 150, 872-879.
- Volkwein, S., Klöppfer, W., & Gühr, R. (1996). Part II: A formalized method of prioritisation by expert panels. En *The valuation step within LCA* (Vol. 1, págs. 182-192). Springer.
- Vracevic, M. (2019). *DOPRINOS TRAJNOSTI ZIDANIH KONSTRUKCIJA*. Doctoral dissertation, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek. Croacia: Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek.
- Wang, S., Gainey, L., Baxter, D., Wang, X., Mackinnon, I., & Xi, Y. (13 de septiembre de 2021). Thermal behaviours of clay mixtures during brick firing: A combined study of in-situ XRD, TGA and thermal dilatometry. *Construction and Building Materials*, 299, 124319.

- Wang, S., Gainey, L., Marinelli, J., Deer, B., Wang, X., Mackinnon, D., & Xi, Y. (17 de enero de 2022). Effects of vermiculite on in-situ thermal behaviour, microstructure, physical and mechanical properties of fired clay bricks. *Construction and Building Materials*, 316, 125828.
- Weidema, B. (1994). Qualitative and quantitative parameters in product impact assessment. En U. d. al., *Integrating impact assessment into LCA. Proceedings of the LCA symposium held* (págs. 29-36). Bruselas: 4º Congreso SETAC-Europa, Abril 11-14.
- Weidema, B. (15 de mayo de 2013). *What is (was) SPOLD?* Recuperado el 19 de junio de 2019, de SPCLD: <https://lca-net.com/spold/whatis.html>
- Wenzel, H., Hauschild, M., & Alting, L. (1997). *Environmental assessment of products, vol. 1, Methodology, tools and case studies in product development*. Chapman & Hall, London, y Kluwer Academic Publishers, Hingham.
- Williams, O., Eastwick, C., Kingman, S., Giddings, D., Lormor, S., & Lester, E. (2017). Overcoming the caking phenomenon in olive mill wastes. *Ind. Crops Prod.*, 101, 92-102.
- Xu, Y., Jiang, L., Xu, J., & Li, Y. (2012). Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick. *Constr. Build. Mater.*, 27(1), 32-38.
- Økstad, E., Larsen, J., & Hanssen, O. (1994). *Environmentally sound product development of carbon lining*. Frederikstad, Noruega: Østfold Research Foundation.
- Zhang, L. (octubre de 2013). Production of bricks from waste materials – A review. *Construction and Building Materials*, 47, 643-655.
- Zhang, Z., Choy Wonga, Y., Arulrajah, A., & Horpibulsuk, S. (10 de noviembre de 2018). A review of studies on bricks using alternative materials and approaches. *Construction and Building Materials*, 188, 1101–1118.

CAPÍTULO II

Hipótesis, Objetivos y Estructura de la Tesis

HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

2.1 Hipótesis de trabajo

La principal hipótesis propuesta es si los materiales fabricados a partir de residuos de origen agrícola e industrial presentan alguna mejora o ventaja en comparación con los materiales de construcción tradicionales. Esta hipótesis se basa en la idea de que utilizar residuos como materia prima para materiales de construcción puede contribuir a reducir el impacto medioambiental, ya que se estaría reciclando y empleando los residuos en lugar de eliminarlos como desechos.

Además, el uso de residuos industriales para fabricar materiales de construcción puede tener un impacto positivo en términos económicos, ya que puede reducir el costo de la producción al utilizar una materia prima más asequible. También puede contribuir a la creación de nuevos empleos en la industria del reciclaje y la fabricación de materiales de construcción sostenibles.

Es importante mencionar que los materiales fabricados a partir de residuos industriales deben cumplir con los mismos estándares de calidad y seguridad que los materiales de construcción tradicionales, ya que se utilizan en estructuras y edificaciones que deben cumplir ciertos requisitos para garantizar la seguridad de las personas. Es posible que sea necesario realizar pruebas y ensayos para evaluar la resistencia y durabilidad de estos materiales antes de utilizarlos en proyectos de construcción.

2.2 Objetivos

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es realizar un estudio comparativo del Análisis de Ciclo de Vida de materiales de construcción tradicionales y fabricados a partir de residuos, que permita determinar el impacto global del CV de los diferentes productos evaluados. A destacar los siguientes cuatro objetivos específicos:

- O. ESPECIFICO 1. DEFINICIÓN DEL OBJETIVO, ALCANCE, LIMITES DEL SISTEMA Y UNIDAD FUNCIONAL.
Se dará respuesta a un conjunto de cuestiones que estipularán la naturaleza del ACV tales como las razones que llevan a realizar el estudio, el público a quien va dirigido y la aplicación prevista.
- O. ESPECIFICO 2. ANÁLISIS DEL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA (ICV).
Se elaborará un inventario para todos los productos a ensayar, donde se recopilará los datos y procedimientos correspondientes a las entradas y salidas para todos los sistemas.

- O. ESPECÍFICO 3. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE CICLO DE VIDA (EICV).
Se determinará la cuantía del impacto asociado a los datos recopilados en el ICV mediante la selección de las categorías y metodologías de impacto y se procesarán los datos a través de las subetapas de las que consta el EICV.
- O. ESPECÍFICO 4. INTERPRETACIÓN.
Se analizarán los resultados y se establecerán las conclusiones del análisis comparativo para los productos ensayados, de acuerdo con el objetivo y alcances marcados en el O. Espec. 1.

2.3 Estructura de la Tesis

La Tesis Doctoral, que aquí se presenta, consiste en un conjunto de trabajos publicados, de acuerdo con el Artículo 25 del *Reglamento de los Estudios de Doctorado de la Universidad de Jaén*, y busca cubrir los objetivos establecidos con el fin de mostrar una alternativa sostenible al sector de la cerámica y de la edificación, que mejoren la viabilidad y la optimización de procesos de cara a su valorización. A continuación, se indican las referencias de los artículos incluidos según el orden seguido en esta tesis:

- **Uceda-Rodríguez, M.**, López-García, A. B., Moreno-Maroto, J. M., Cobo-Ceacero, C. J., Cotes-Palomino, M. T., & Martínez García, C. (2020). *Evaluation of the environmental benefits associated with the addition of olive pomace in the manufacture of lightweight aggregates*. *Materials*, 13(10), 2351. DOI: 10.3390/ma13102351.
- **Uceda-Rodríguez, M.**, Moreno-Maroto, J. M., Cobo-Ceacero, C. J., López-García, A. B., Cotes-Palomino, T., & Martínez-García, C. (2022). *Comparative Life Cycle Assessment of lightweight Aggregates Made from Waste—Applying the Circular Economy*. *Applied Sciences*, 12(4), 1917. DOI: 10.3390/app12041917.
- López-García, A. B., Cotes-Palomino, T., **Uceda-Rodríguez, M.**, Moreno-Maroto, J. M., Cobo-Ceacero, C. J., Andreola, N. M., & Martínez-García, C. (2021). *Application of Life Cycle Assessment in the Environmental Study of Sustainable Ceramic Bricks Made with ‘alperujo’ (Olive Pomace)*. *Applied Sciences*, 11(5), 2278. DOI: 10.3390/app11052278.
- López-García, A. B., **Uceda-Rodríguez, M.**, Leon-Gutierrez, S., Cobo-Ceacero, C. J. & Moreno-Maroto, J. M. (2021). *Eco-efficient transformation of mineral wool wastes into lightweight aggregates at low firing temperature and associated environmental assessment*. *Construction and building materials*, 345, 128294. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128294.

Los cuatro artículos presentan diferentes hitos concatenados a lo largo de los años en los que el Grupo de Investigación amplió sus horizontes, donde se pasó del estudio de los elementos de fábrica, como son los ladrillos, a los áridos ligeros artificiales. La cercanía con uno de los focos principales de producción de ladrillos, que es la región de Bailén (Jaén), hizo que durante años el equipo de investigadores ampliara con sus trabajos el conocimiento colectivo del potencial que podían adquirir los ladrillos. Con una base bien establecida y con numerosas publicaciones en todo el mundo, el poco avance que se lograría conseguir se encontraba muy limitado a la variabilidad de aditivos o nutrientes que podían utilizarse. El residuo del alpeorajo, uno de estos nutrientes tecnológicos, era la elección por excelencia en la comarca debido a los altos volúmenes que se generan. Conocer su impacto ambiental era necesario, no solo para establecer un broche y final del capítulo, sino garantizar un inicio consolidado en el siguiente: los áridos ligeros artificiales. Como segunda materia prima más consumida en el mundo, precedida por el agua, el prometedor futuro de los áridos ligeros artificiales y su versatilidad para elaborar mezclas con propiedades tecnológicas avanzadas, fueron algunas de las motivaciones que guio al Grupo en su paso de los ladrillos a los áridos ligeros. La obtención de resultados prometedores en diversas áreas de aplicación que van desde la construcción, la agricultura o la ingeniería civil, no solo daba viabilidad a la transferencia de conocimiento del laboratorio a la sociedad, sino que además proporcionaba un valor añadido a materias primas locales como la arcilla. De esta forma, su producción puede dar lugar a un impulso económico en estas regiones. Ampliar el abanico de residuos empleado a ubicaciones vecinas como es Granada con el lodo de depuradora de papel, el polvo de corcho en Extremadura y Andalucía nororiental, la lana mineral y la cáscara de almendra y avellana de tierras catalanas o incluso los posos de café provenientes de una empresa portuguesa, ampliaba las oportunidades de fabricación locales en distintos puntos de elaboración. Conocer las implicaciones medioambientales que suponen la producción de elementos con alta demanda energética es clave para lograr una optimización de los procesos y proteger al planeta y a la sociedad con herramientas a nuestro alcance y en pro de la sostenibilidad.

La Tesis Doctoral se divide en seis capítulos y cinco anexos: el primer capítulo presenta una *introducción* al tema tratado, los cuatro siguientes detallan los *artículos* publicados en revistas de impacto indexadas en el *Journal Citation Reports* y, en el último, quedan recogidas las *conclusiones generales* de los mismos. La investigación llevada a cabo durante el periodo que cubre este trabajo, ha dado lugar a seis publicaciones adicionales, indexadas en el JCR y pertenecientes al primer y segundo cuartil (*v. Anexo E*), así como quince aportaciones a Congresos, once de ellas de carácter internacional, y dos patentes, una de ellas de alcance internacional (*v. Anexo F*). El desarrollo de estos estudios ha contado con la participación de investigadores externos a la Universidad de Jaén, en el que destacarían universidades

nacionales como la Universidad de Granada o la Universidad de Castilla La Mancha, y colaboraciones internaciones con el Dipartimento di Ingegneria “Enzo Ferrari” de la Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia (*Italia*). Estas investigaciones se enmarcan dentro de proyectos financiados por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y fondos FEDER:

- **MAT2015-70034-R.** SMARTMATS: *Smart materials for sustainable construction*. Universidad de cabecera: UJA
- **CTM2016-75977-R.** *Implementación de una alternativa sostenible para la gestión integral del alpeorajo, un residuo contaminante de la industria oleícola*. Universidad de cabecera: UGR
- **PID2019-109520RB-I00.** ECO-MET-AL: *¿Pueden los residuos metálicos industriales y mineros producir áridos ligeros sostenibles? Aplicando la Economía Circular*. Universidad de cabecera: UJA

Participación con ponencia oral en congresos nacionales e internacionales

- Statistical design methods as a very useful tool for obtaining lightweight aggregates on demand in a relatively short time. **LVIII Congreso Nacional de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio.** SOCIEDAD ESPAÑOLA DE CERAMICA Y VIDRIO. 2022. España. Participativo - Ponencia oral (comunicación oral). Congreso.
- El árido ligero: una alternativa circular para una construcción más sostenible. **LVII Congreso Nacional de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio.** SOCIEDAD ESPAÑOLA DE CERAMICA Y VIDRIO. 2020. España. Participativo - Ponencia oral (comunicación oral). Congreso.
- Environmental impact of the valorization of olive pomace for the production of ceramic materials: an example of circular economy. **27th International Conference on Composites or Nano Engineering.** ICCE. 2019. España. Participativo - Ponencia oral (comunicación oral). Congreso.
- Study of the foaming effect of paper and cork residues on non-self-bloating clays for lightweight aggregate production. **27th International Conference on Composites or Nano Engineering.** ICCE. 2019. España. Participativo - Ponencia oral (comunicación oral). Congreso.
- Valorization of cork powder residue as an additive for the development of ecological bricks. **27th International Conference on Composites or Nano Engineering.** ICCE. 2019. España. Participativo - Ponencia oral (comunicación oral). Congreso.

- Recycling of ‘alperujo’ (olive pomace) as a key additive in the manufacture of lightweight aggregates. **International Conference on Green Construction 2019**. Universidad de Córdoba. 2019. España. Participativo - Ponencia oral (comunicación oral). Congreso.
- Estudio de la viabilidad de arcillas cerámicas europeas para la producción de áridos ligeros. **I Jornada de Jóvenes Investigadores de Cerámica y Vidrio de Sevilla**. SOCIEDAD ESPAÑOLA DE CERAMICA Y VIDRIO. 2019. España. Participativo - Ponencia oral (comunicación oral). Congreso.
- Alternative raw materials for the ceramics industry in southern Spain. **V Congreso Hispano-Luso de Cerámica y Vidrio y LVI Congreso Nacional de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**. SOCIEDAD ESPAÑOLA DE CERAMICA Y VIDRIO. 2018. España. Participativo - Ponencia oral (comunicación oral). Congreso.

Participación con póster en congresos nacionales e internacionales

- Manufacture of lightweight aggregates from mixtures of Kaolin and Iron-rich waste. **VENICE 2022 - 9th International Symposium on Energy from Biomass and Waste**. IWWG - International Waste Working Group. 2022. Italia.
- Influence of the Presence of Iron in the Form of Fe_3O_4 on the Manufacture of lightweight Aggregates. **CIMTEC 2022 - 15th International Conference on Modern Materials and Technologies**. National Research Council of Italy. 2022. Italia.
- Reuse of Waste Glass Wool generated in the Process of Demolition and Restoration of Buildings for the Production of Artificial lightweight Aggregates. **CIMTEC 2022 - 15th International Conference on Modern Materials and Technologies**. National Research Council of Italy. 2022. Italia.
- Impacto generado por la adición de Fe_3O_4 , FeS_2 , Na_2CO_3 y carbono orgánico en la expansión térmica de áridos ligeros sinterizados a partir de caolín. **LVIII Congreso Nacional de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**. Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 2022. España.
- Statistical design methods as a very useful tool for obtaining lightweight aggregates on demand in a relatively short time. **LVIII Congreso Nacional de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**. Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 2022. España.
- Sustainability study on the application of industrial waste in the production of lightweight aggregates. **UNIA Environment Workshops 2021 -**

Engineering and Circular Economy: The Road to Sustainability. Universidad Internacional de Andalucía. 2021. España.

- A review of the most important milestones on lightweight aggregates in the last few years. **UNIA Environment Workshops 2021 - Engineering and Circular Economy: The Road to Sustainability.** Universidad Internacional de Andalucía. 2021. España.
- Environmental improvements associated with the use of waste in the manufacturing of construction materials. **UNIA Environment Workshops 2021 - Engineering and Circular Economy: The Road to Sustainability.** Universidad Internacional de Andalucía. 2021. España.
- Manufacturing of sustainable lightweight materials for a circular construction. **UNIA Environment Workshops 2021 - Engineering and Circular Economy: The Road to Sustainability.** Universidad Internacional de Andalucía. 2021. España.
- Aplicación del análisis del ciclo de vida en el estudio ambiental de ladrillos cerámicos sostenibles fabricados con alpeorujo. **LVII Congreso Nacional de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio.** Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 2020. España.
- Environmental impact assessment of lightweight aggregates added with 'alpeorujo' using a Life cycle analysis. Jornadas Doctorales 2019 para Jóvenes Investigadores de la UJA. Universidad de Jaén. 2019. España. Participativo - Póster. Jornada. A comparative study of the use of sludge from industry to obtain sustainable materials: An example of Circular Economy. **International Workshop on Woman in Ceramic Science (WoCeram2019).** European Platform of Women Scientists EPWS. 2019. Hungría.
- Sustainable materials based on clay and vermiculite: Applying the green economy. **22ª Fiera internazionale del recupero di materia ed energia e dello sviluppo sostenibile.** Ecomondo. 2018. Italia.

CAPÍTULO III

Metodología Experimental

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este apartado se detallan los Materiales y Métodos empleados para lograr las hipótesis y los objetivos desarrollados en el Capítulo 2, dividido en las Fases de la Figura 14.

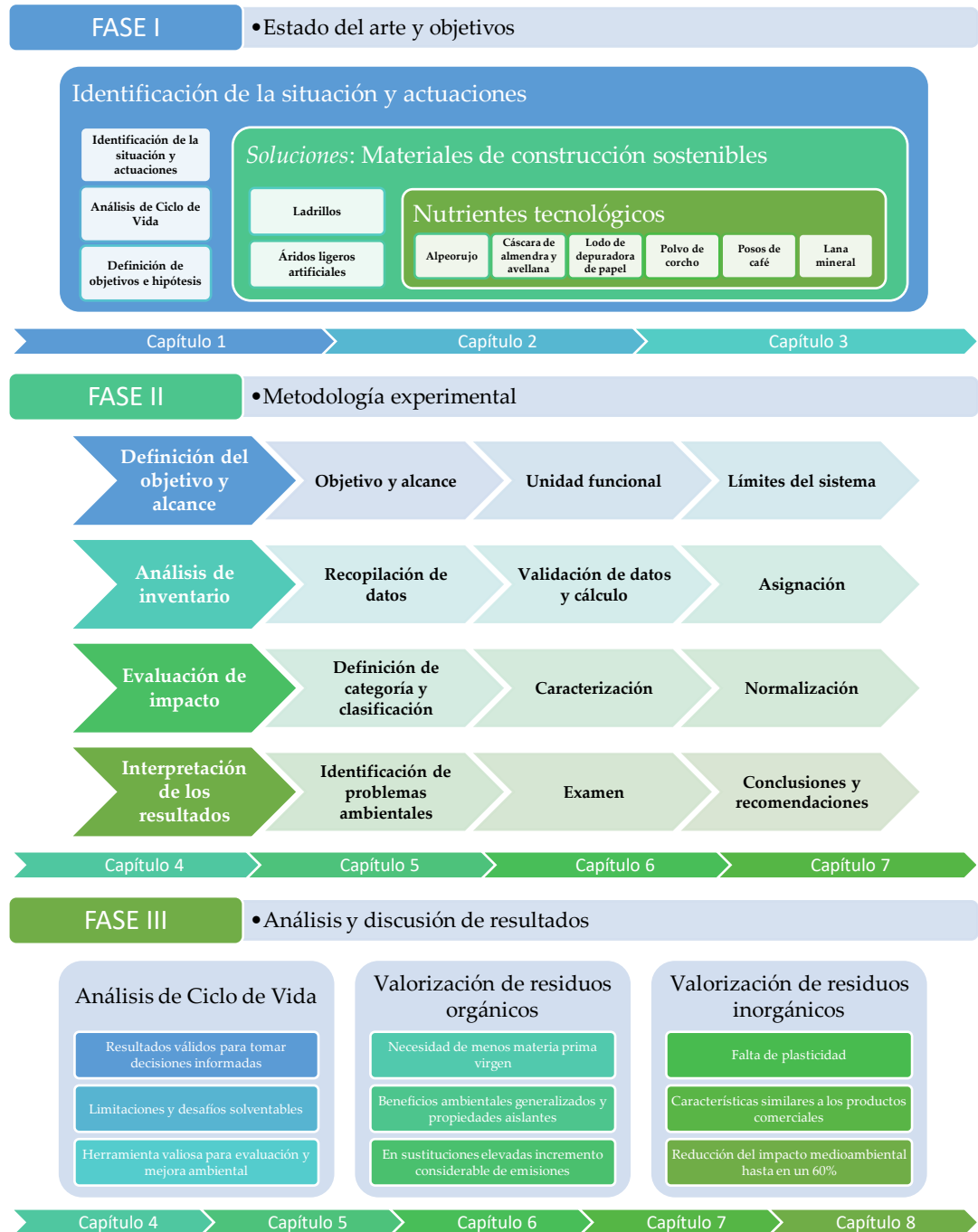


Figura 14. Representación esquemática de la secuencia de Fases de trabajo.

La metodología experimental recoge las distintas técnicas y procedimientos generales que se han seguido en los casos de estudio contenidos en los Capítulos 4 a 7 de esta Tesis por compendio de artículos. Todas las particularidades y detalles individuales de cada uno están recogidos en su capítulo respectivo de forma individual.

La materia prima es un material básico que se utiliza para producir bienes, productos terminados, energía o materiales intermedios que son materia prima para futuros productos terminados, es decir, que se encuentre en su forma natural o que haya sufrido la transformación necesaria para prepararlo para su futuro uso. Esto último toma relevancia en la época actual. Los residuos, que bien podrían considerarse el estado último de la materia, y cuyo destino se encontraba en el vertedero, o en un moderado reciclaje, está presentando cada día más una revolución industrial, potenciada por la Economía Circular, mediante la cual, dicho residuo vuelve a transformarse en una materia prima con la que se cierra el círculo, generando así una reducción de la explotación de nuevos recursos naturales, protegiendo al medio ambiente de los vertidos que pudieran realizarse y, a la vez, no se desaprovecha toda la energía embebida que dichos materiales han ido acumulando a lo largo de su vida, convirtiéndose en nutrientes tecnológicos.

3.1 Materias primas principales: Arcilla

La arcilla es una roca natural de grano fino o material del suelo que combina uno o más minerales arcillosos con posibles trazas de cuarzo (SiO_2), óxidos metálicos (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , etc.) y materia orgánica. Los depósitos geológicos de arcilla están compuestos principalmente de minerales filosilicatos que contienen cantidades variables de agua atrapadas en la estructura mineral. Las arcillas son plásticas debido al tamaño y geometría de las partículas, así como al contenido de agua, y se vuelven duras, quebradizas y no plásticas al secarse o cocerse (Guggenheim & Martin, 1995; Earth Sciences department, 2016; Science Learning Hub, 2016). Dependiendo del contenido del suelo en el que se encuentren, las arcillas pueden aparecer en una variedad de colores que van desde el blanco, pasando por el gris opaco o el marrón, hasta llegar a un color rojo-naranja intenso.

3.1.1 Arcilla Blanca Española

La arcilla blanca española (SW) ha sido suministrada por la empresa *Comercial Cerámicas de Bailén, S.A.*, y proviene de la localidad de Bailén, ubicada en la provincia jienense. A continuación, se detallan de manera pormenorizada los resultados obtenidos de su caracterización.

El análisis elemental realizado en SCAI de Málaga, proporcionó los siguientes resultados:



Figura 15. Arcilla Blanca Española.

Tabla 3. Análisis elemental de la arcilla SW.

C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)
4,35	0,46	0,04	0	-

El contenido en carbono realizado en Toledo, proporcionó los siguientes resultados:

Tabla 4. Contenido en carbono de la arcilla SW.

CT (%)	CI (%)	CO (%)	Carbonatos (%)
4,45	4,4	0,05	36,7

La fluorescencia de Rayos X realizada en Keramex, proporcionó los siguientes resultados:

Tabla 5. FRX de la arcilla SW.

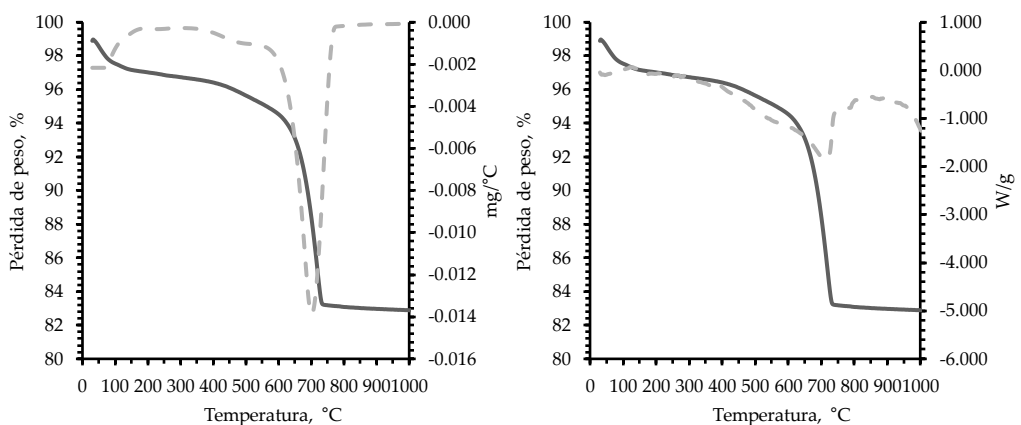
LOI (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ + FeO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	MnO	SO ₃	SrO	P ₂ O ₅	ZrO ₂
19,9	43,9	8,5	3,3	0,2	1,6	2,1	20	0,4	0,1	0,1	-	0,1	-

La difracción de Rayos X realizada en Toledo, proporcionó los siguientes resultados:

Tabla 6. DRX de la arcilla SW.

Mayor	Menor	Trazas
Calcita, Esmectita	Cuarzo, Dolomita, Illita	Caolinita

El Análisis Termogravimétrico y la Calorimetría Diferencial de Barrido realizados en Toledo, proporcionó los siguientes resultados:

**Figura 16.** TGA-DSC de la arcilla SW.

3.1.2 Arcilla Rubia Española

La arcilla rubia española (SY) ha sido suministrada por la empresa *Comercial Cerámicas de Bailén, S.A.*, y proviene de la localidad de Bailén, ubicada en la provincia jienense. A continuación, se detallan de manera pormenorizada los resultados obtenidos de su caracterización.

El análisis elemental realizado en SCAI de Málaga, proporcionó los siguientes resultados:



Figura 17. Arcilla Rubia Española.

Tabla 7. Análisis elemental de la arcilla SY.

C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)
1,89	0,32	0,04	0	- ¹

¹ No se determinó, dado que el equipo utilizado no disponía de este sensor.

El contenido en carbono realizado en Toledo, proporcionó los siguientes resultados:

Tabla 8. Contenido en carbono de la arcilla SY.

CT (%)	CI (%)	CO (%)	Carbonatos (%)
2,03	1,9	0,13	15,8

La fluorescencia de Rayos X realizada en Keramex, proporcionó los siguientes resultados:

Tabla 9. FRX de la arcilla SY.

LOI (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ + FeO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	MnO	SO ₃	SrO	P ₂ O ₅	ZrO ₂
9,4	62,1	11,6	4,1	0,6	2,7	1,4	7,4	0,7	-	-	-	0,1	0,1

La difracción de Rayos X realizada en Toledo, proporcionó los siguientes resultados:

Tabla 10. DRX de la arcilla SY.

Mayor	Menor	Trazas
Calcita, Esmectita, Illita	Cuarzo, Dolomita, Plagioclasa	Caolinita

El Análisis Termogravimétrico y la Calorimetría Diferencial de Barrido realizados en Toledo, proporcionó los siguientes resultados:

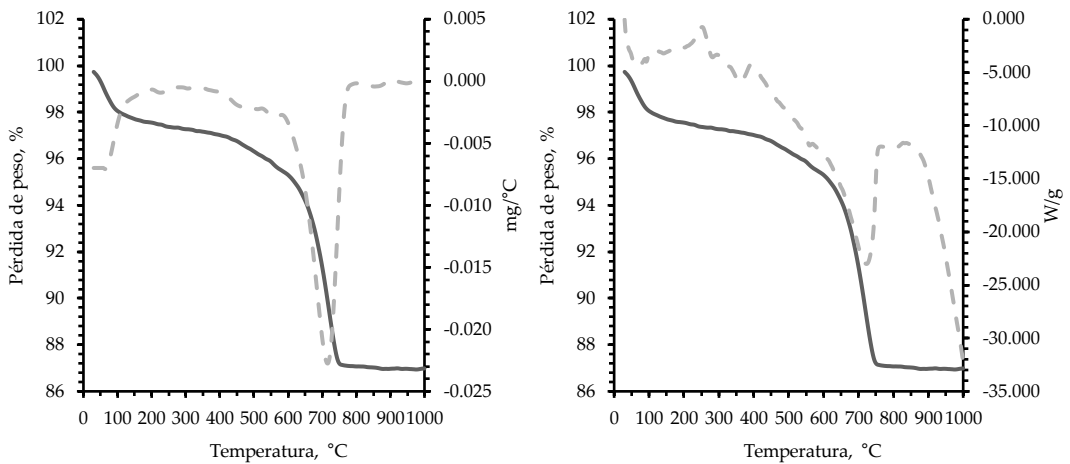


Figura 18. TGA-DSC de la arcilla SY.

3.1.3 Arcilla Roja Portuguesa

La arcilla rubia española (PR) ha sido suministrada por la empresa *Corbário Minerais Industriais, S.A.*, y proviene de la localidad de Bailén, ubicada en la provincia jienense. A continuación, se detallan de manera pormenorizada los resultados obtenidos de su caracterización.

El análisis elemental realizado en SCAI de Málaga, proporcionó los siguientes resultados:



Tabla 11. Análisis elemental de la arcilla PR.

C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)
0,05	0,18	0,07	0,00	1,97

Figura 19. Arcilla Roja Portuguesa.

El contenido en carbono realizado en Toledo, proporcionó los siguientes resultados:

Tabla 12. Contenido en carbono de la arcilla PR.

CT (%)	CI (%)	CO (%)	Carbonatos (%)
0,02	0	0,02	0

La fluorescencia de Rayos X realizada en Keramex, proporcionó los siguientes resultados:

Tabla 13. FRX de la arcilla PR.

LOI (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ + FeO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	MnO	SO ₃	SrO	P ₂ O ₅	ZrO ₂
3,6	78,4	10,9	4	0,4	1,3	0,3	-	0,7	-	-	-	-	-

La difracción de Rayos X realizada en Toledo, proporcionó los siguientes resultados:

Tabla 14. DRX de la arcilla PR.

Mayor	Menor	Trazas
Cuarzo, Illita, Caolinita	-	-

El Análisis Termogravimétrico y la Calorimetría Diferencial de Barrido realizados en Toledo, proporcionó los siguientes resultados:

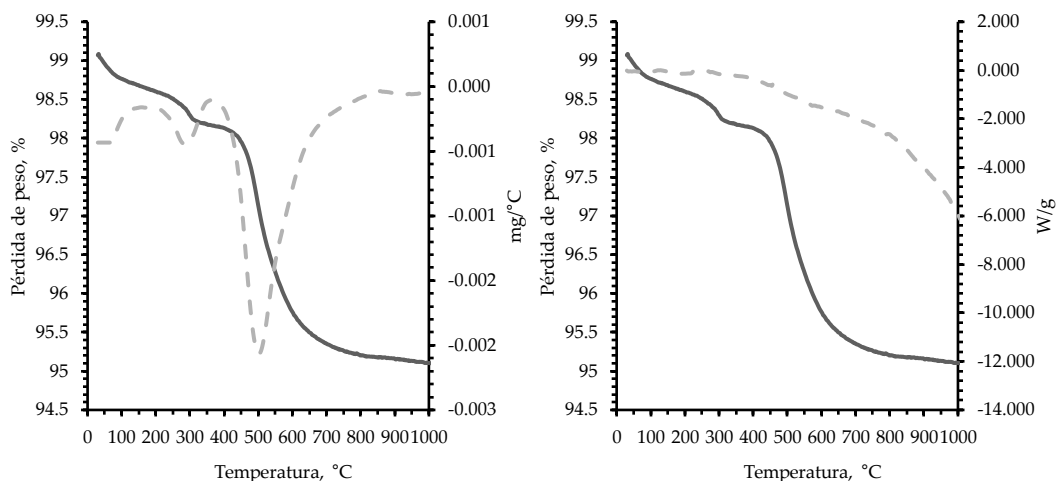


Figura 20. TGA-DSC de la arcilla PR.

3.1.4 Arcilla Rubia Portuguesa

La arcilla rubia portuguesa (PY) ha sido suministrada por la empresa *Corbário Minerais Industriais, S.A.*, y proviene de la localidad de Bailén, ubicada en la provincia jienense. A continuación, se detallan de manera pormenorizada los resultados obtenidos de su caracterización.

El análisis elemental realizado en SCAI de Málaga, proporcionó los siguientes resultados:



Figura 21. Arcilla Rubia Portuguesa.

Tabla 15. Análisis elemental de la arcilla PY.

C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)
0,27	0,53	0,06	0,01	5,12

El contenido en carbono realizado en Toledo, proporcionó los siguientes resultados:

Tabla 16. Contenido en carbono de la arcilla PY.

CT (%)	CI (%)	CO (%)	Carbonatos (%)
0,37	0,29	0,08	2,4

La fluorescencia de Rayos X realizada en Keramex, proporcionó los siguientes resultados:

Tabla 17. FRX de la arcilla PY.

LOI (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ + FeO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	MnO	SO ₃	SrO	P ₂ O ₅	ZrO ₂
6,7	64,4	14	5,5	0,4	3,2	2,5	2	1	0,1	-	-	-	-

La difracción de Rayos X realizada en Toledo, proporcionó los siguientes resultados:

Tabla 18. DRX de la arcilla PY.

Mayor	Menor	Trazas
Esmectita, Paligorskita	Cuarzo, Calcita, Caolinita, Illita	Feldespato

El Análisis Termogravimétrico y la Calorimetría Diferencial de Barrido realizados en Toledo, proporcionó los siguientes resultados:

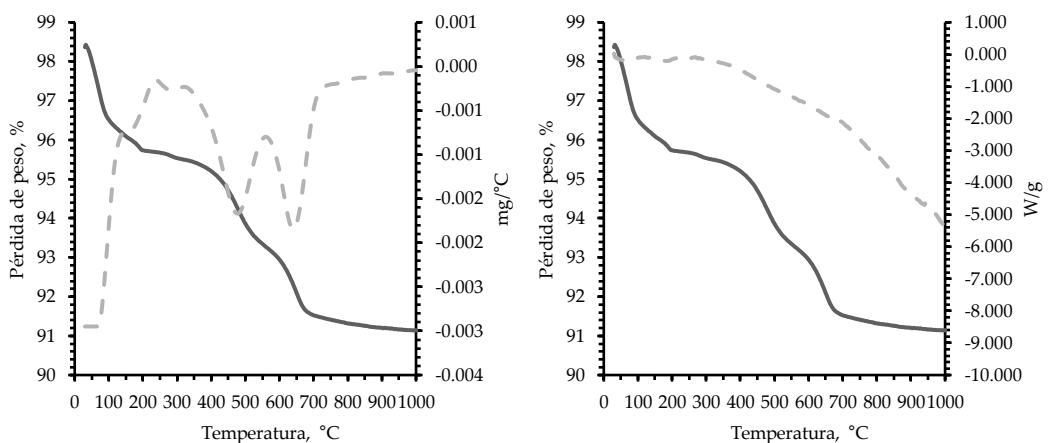


Figura 22. TGA-DSC de la arcilla PY.

3.2 Materias primas secundarias: Residuos

Cada año, la industria genera cantidades masivas de residuos que no solo dañan gravemente el medio ambiente, sino que también representan una gran cantidad de energía y valor económico desperdiciado. La Economía Circular busca cambiar esto, aprovechando estos residuos como materia prima en procesos previamente adaptados o completamente nuevos. Dado que la composición de los residuos puede variar ampliamente según el tipo de proceso industrial del que provienen, su destino y aplicabilidad dependerán de su composición y comportamiento. Una diferenciación *grosso modo* sería el carácter orgánico o inorgánico del material, de gran importancia a la hora de generar nuevos materiales que deben someterse a altas temperaturas para lograr su sinterización. Los residuos que se han empleado en los sucesivos capítulos son los siguientes:

3.2.1 Alpeorujó

El alpeorujó (A), alperujó u orujó húmedo, es el orujó de aceituna, una combinación de cascarilla y pulpa de aceituna (*alrededor del 20% en peso*), hueso de aceituna triturado (*sobre el 15%*) y agua residual de la almazara, alcanzando un contenido de humedad de alrededor del 65% (Arjona, García, & Ollero, 1999; De la Casa, Romero, Jiménez, & Castro, 2012; Williams, y otros, 2017). El residuo fue suministrado por el Consejo Regulador de la Denominación de Origen Sierra del Segura, de la localidad de La Puerta de Segura, de la provincia de Jaén. Según los resultados estimados por



Figura 23. Alpeorujó.

AGAPA (AGAPA, 2015), de los 5,8 millones de toneladas de aceitunas que se procesan anualmente en las agroindustrias olivícolas, se generan más de 4 millones de toneladas de orujó de oliva, lo que representa aproximadamente el 65% del peso inicial. Esta cifra supera el 80% si se cuenta también el hueso de aceituna y otros residuos asociados. Según Williams et al. (Williams, y otros, 2017), la eliminación de estos residuos en vertederos o en ecosistemas acuáticos (*ríos, mares, lagos, etc.*) provoca su contaminación, así como otros efectos adversos, como olores indeseables o un aumento de la fitotoxicidad. En consecuencia, la recuperación de los residuos de la industria del aceite de oliva es esencial (Moreno-Maroto, y otros, 2019). Este residuo estaría clasificado con el código LER 020101 (Gobierno de España, 2002).

3.2.2 Cáscara de almendra y avellana

La cáscara de almendra y avellana ha sido cedida por la UNIO Corporación Alimentaria de Reus, en Tarragona, una cooperativa de 2º grado dedicada a la comercialización de frutos secos, vino y aceite principalmente, y también a lo que se denomina CORYLUS (harina de la cáscara de almendra), y que se cuantifican en 10 mil toneladas recibidas cada año. Una de las mayores ventajas de las cáscaras de frutos secos procesadas es que van en la línea europea, favorable a excipientes orgánicos porque no generan residuos y no tienen efectos secundarios. Además de los usos veterinarios, como excipiente en la fabricación de medicamentos, estas cáscaras también se pueden transformar en biomasa, harinas y base para jabones gracias a sus propiedades (EFE, 2012). Este residuo estaría clasificado con el código LER 020103 (Gobierno de España, 2002).



Figura 24. Cáscara de almendra y avellana.

3.2.3 Lodo de depuradora de papel

El lodo de depuradora de papel suministrado de la empresa COTTON SOUTH, S.L., actual CELSUR (CELSUR, s.f.), es el lodo obtenido en el proceso de depuración biológica de las aguas residuales generadas en la planta de obtención de papel moneda a partir de «linters» de algodón. España es uno de los mayores productores europeos de papel y celulosa, fabricando una cuarta parte de la producción europea y con un total de 81 plantas distribuidas por todo el territorio nacional (ASPAPPEL, s.f.). La cantidad de residuos que se generan al año en la industria del papel es de alrededor de 1,45 millones de toneladas, frente a las 7,5 millones de toneladas de papel fabricado, y recupera más de 5,5 millones de toneladas como papel reciclado (Rübner & Hoffmann, 2006). Estos residuos presentan unas características fisicoquímicas especiales, y junto a una elevada cantidad de materia orgánica, permite tener grandes ventajas de cara a su valorización. En la actualidad, el destino de estos residuos es el vertedero con el consecuente impacto ambiental que esto supone, de ahí la oportunidad de aprovechar este material de cara a su reutilización (Molina Sampedro, 2018). Este residuo estaría clasificado con el código LER 030307 (Gobierno de España, 2002).



Figura 25. Lodo de depuradora de papel.

3.2.4 *Polvo de corcho*

El polvo de corcho es suministrado por EUROTAPON NÚÑEZ, S.L. (Eurotapón Núñez, S.L., s.f.). El polvo de corcho proviene del tallado del corcho para la producción de tapones de este material, el cual se extrae de la corteza del alcornoque. Sus propiedades le atribuyen unas cualidades únicas que ningún invento hasta ahora ha podido igualar y menos aún mejorar. Entre algunas de estas cualidades se encuentran su ligereza, elasticidad, gran adherencia,



Figura 26. Polvo de corcho.

impermeabilidad, manejabilidad, nivel de porosidad, facilidad de extracción, baja humedad, aislante térmico y acústico, además de biodegradable, renovable y reciclable (Bas, 2017). Este residuo estaría clasificado con el código LER 030101 (Gobierno de España, 2002).

3.2.5 *Posos de café*

Los posos de café han sido suministrados por la empresa portuguesa DELTA Cafés. En la actualidad, se generan cerca de 20 millones de toneladas al año de restos de café debido al consumo que se hace de esta bebida, la mayor parte de estos terminan en el vertedero, aunque algunas cantidades encuentran un uso comercial como fertilizante agrícola (Bravo, y otros, 2012). Debido a su fuerte acidez, los posos de café pueden incrementar el pH del suelo, por lo que su reutilización podría contribuir a la mejora del medio ambiente y a la reducción de los residuos orgánicos (UNAV, 2013). Este residuo estaría clasificado con el código LER 020301 (Gobierno de España, 2002).



Figura 27. Posos de café.

3.2.6 *Lana mineral*

La lana de vidrio y de roca han sido suministradas por la empresa Saint Gobain Isover, S.L. Si bien el dato es complejo de determinar con exactitud, se estima que la producción de residuos de estos aislantes es de 2,5 millones de toneladas solo en 2020 (Väntsi & Kärki, 2014). La elevada producción ha generado diversas ramas de estudio para aplicación de este residuo en la industria, como en la fabricación de hormigón, mortero, compuestos de madera y plástico, yeso, espumas



Figura 28. Lana mineral.

cerámicas, mezclas asfálticas o, incluso, como precursor para la activación alcalina. Este residuo estaría clasificado con los códigos LER 101103 y 170604 (Gobierno de España, 2002).

3.3 Metodología aplicada

La metodología seguida en cada uno de los estudios puede dividirse en seis partes. Dentro de esta sección abarcaremos las tres primeras, en las cuales se define el objetivo y alcance de nuestro ACV, se establece la plataforma informática donde nos apoyaremos para realizar el estudio, y se procede a seleccionar la metodología más adecuada. Las últimas tres partes, consistentes en la elaboración del inventario de ciclo de vida y los procesos que este incluye para cada uno de los ladrillos y áridos, la evaluación del impacto que la producción de estos supondría y la interpretación de los resultados mediante un análisis de contribución e influencia, se encuentran localizados dentro de los capítulos correspondientes.

3.3.1 Definición del objetivo y alcance

De acuerdo a lo explicado en apartados anteriores, este estudio se ha centrado en:

El objetivo de este estudio de ciclo de vida pretende analizar el impacto medioambiental que implicaría la fabricación de ladrillos y áridos ligeros artificiales en base a diferentes arcillas y productos industriales residuales.

La producción actual de áridos implica la sobreexplotación de canteras y graveras naturales, unido esto al fuerte impacto ambiental que ello supone. La fabricación de áridos sintéticos permite un proceso de control más exhaustivo, lo que lleva a la obtención de materiales con mejores propiedades e, incluso, más avanzadas. Si a esto se le suma la incorporación de residuos, se puede conseguir disminuir las necesidades energéticas como es también el caso de los ladrillos, para buscar minimizar su impacto en el medio.

En el caso de una economía lineal, la extracción de la materia prima principal, la arcilla, provendría de las mismas canteras dedicadas actualmente a la producción de materiales cerámicos para la construcción, como ladrillos o tejas, dándoles un valor añadido a las regiones productoras. Posteriormente, el estudio de impacto ambiental podría proponer la restauración de las áreas afectadas por la actividad para recuperar el terreno ocupado y destinarlo a otro uso.

En el caso de una economía circular, o ingeniería circular, la materia prima podría venir de vertederos de suelo de construcción, o de material rechazado en obra, esto, unido a la utilización de residuos industriales, no solo permitiría eliminar materiales catalogados previamente de inservibles dándoles una segunda vida, sino que, a su vez, podría mejorar las propiedades del producto final.

El alcance de este análisis tomará un enfoque «de la cuna a la puerta», donde se analizará el impacto que suponen desde la extracción de la materia prima, pasando a la

producción de los materiales y piezas del producto, hasta que el producto final sale de la puerta de la fábrica, por lo tanto, quedan excluidas las etapas de vida útil y fin de vida, dado que su inclusión sobrepasaría los límites perseguidos en la elaboración de este trabajo. En este estudio, y como unidad funcional, se ha analizado y comparado la fabricación a nivel industrial, y con datos de escalabilidad global, **un kilo (1 kg) de ladrillos/áridos ligeros artificiales producidos a base de diferentes arcillas y con residuos de origen agrícola e industrial, variando los porcentajes en peso y las temperaturas de sinterización de los mismos.**

3.3.2 *Plataforma de cálculo y análisis seleccionadas*

Al decidir qué programa, o programas, se utilizará, es necesario tener en cuenta varios criterios. Uno de los puntos fundamentales para un buen software de ciclo de vida es el número de bases de datos que incorpora, así como el origen de estas, su calidad y alcance. Además, es conveniente que el programa permita editar las bases de datos existentes e importar fácilmente nuevas bases que puedan adquirirse posteriormente. Del mismo modo, es importante comprobar la facilidad de uso del programa en función de la aplicación que tendrá, la posibilidad de utilizar diferentes métodos de evaluación de impacto, la trazabilidad de los resultados, la interfaz y las posibilidades gráficas que ofrece y evidentemente su coste económico.

El programa utilizado en este estudio ha sido **SimaPro**[®] en su versión 8.3.0.0 de la empresa PRé Consultants. SimaPro, como hemos visto previamente en 1.7.1, es una herramienta profesional para recolectar, analizar y monitorear los datos de desempeño de sostenibilidad de los productos y servicios de su empresa. El software puede ser utilizado para una amplia variedad de aplicaciones, tales como informes de sostenibilidad, huella de carbono y de agua, diseño de productos, generación de declaraciones ambientales de productos y determinación de indicadores clave de rendimiento.

El programa cumple todos los requisitos buscados, lo que lo hace idóneo para la tarea a desarrollar.

Como complemento del software de análisis de ciclo de vida, se ha utilizado una herramienta de hojas de cálculo, **Microsoft Excel**[®], actuando como soporte para la incorporación, cálculo y procesado de datos y resultados para SimaPro.

3.3.3 *Metodología de evaluación del impacto*

La metodología de cálculo seleccionada ha sido CML 2000 en su versión 2.05, un método orientado al punto medio que fue desarrollado por primera vez en 1992 por el Instituto de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden (University of Leiden, s.f.). La elección viene fundada por los siguientes motivos:

- la amplia variedad de estudios y artículos científicos que avalan su correcto funcionamiento,
- la caracterización se basa en valores medios globales y europeos, y
- la versatilidad que ofrece las categorías de impacto que calcula, permitiendo conocer, en una misma metodología, las áreas de protección correspondientes a la salud humana, el medioambiente, el entorno artificial y los recursos naturales.

Las categorías de impacto de línea base que analiza esta versión de la metodología son:



Figura 29. Categorías de impacto analizadas.

La validez regional de las categorías de impacto de la metodología CML es global, excepto para la acidificación y la oxidación fotoquímica, que se basan en valores medios europeos (Guinée, y otros, 2002; Gorrée, y otros, 2002).

Con respecto a esta metodología, los resultados también se han evaluado desde un punto de vista normalizado con respecto a los efectos ambientales causados por un europeo medio en un año, esto nos permite obtener una visión más real sobre la importancia relativa de los distintos efectos ambientales. A continuación, vamos a proceder a mostrar los resultados obtenidos para cada una de las etapas de producción de los áridos propuestos.

CAPÍTULO IV

Evaluación de los beneficios medioambientales asociados a la adición de orujo de oliva en la fabricación de áridos ligeros

Tabla 19. Información de la primera publicación

Revista MATERIALS			
Volumen		Número	Páginas
13		10	2351
Recibido		Aceptado	Publicado
29 de abril de 2020		18 de mayo de 2020	20 de mayo de 2020
DOI	10.3390/ma13102351	Veces citado	9
Indicio de calidad	2020 JOURNAL IMPACT FACTOR (JIF):		3.623
Categoría	Rango JIF	Cuartil JIF	Percentil JIF
Metallurgy & Metallurgical Engineering	17/80	Q1	79,38
Materials Science, Multidisciplinary	152/334	Q2	54,64
Physics, Condensed Matter	27/69	Q2	61,59
Chemistry, Physical	79/162	Q2	51,54
Physics, Applied	51/160	Q2	68,44

1. Referencia (autores, título): Uceda-Rodríguez, M., Moreno-Maroto, J. M., Cobo-Ceacero, C. J., López-García, A. B., Cotes-Palomino, T., & Martínez-García, C. Comparative Life Cycle Assessment of lightweight Aggregates Made from Waste—Applying the Circular Economy
2. Breve resumen: Investigations on the application of Life Cycle Assessment (LCA) to the construction sector have shown that the environmental impact of construction products can be significantly reduced. To achieve this, the use of best available techniques and eco-innovation in production plants must be promoted. In this way, the use of finite natural resources can be replaced by waste generated in other production processes, preferably available locally, stimulating the creation of more sustainable products. Conducting a comparative LCA study between the traditional ceramic brick manufacturing process and the ceramic brick manufacturing process incorporating 'alperujo' (waste generated in the virgin oil extraction process), is an inevitable step to achieve the integration of circularity and eco-innovation in the production system of traditional ceramic materials, through the CML(Centrum voor Milieukunde Leiden) and IPCC(The Intergovernmental Panel on Climate Change) methodology. The obtained results suggest that the environmental benefits in this practice are very limited, even taking into account the contribution of different amounts of this waste to the production of bricks.
3. Fecha de publicación: 4 de marzo de 2021
4. Estado: Publicado
5. Tipo de publicación: Artículo científico
6. Categoría: Chemistry, multidisciplinary; Materials Science, Multidisciplinary; Physics, Applied; Engineering, multidisciplinary
7. Ubicación: Suiza
8. Otros datos de interés: Artículo Q1 de JCR. DOI: 10.3390/ma13102351

CAPÍTULO V

Aplicación de la evaluación del ciclo de vida en el estudio ambiental de ladrillos cerámicos sostenibles fabricados con alperujo

Tabla 23. Información de la segunda publicación

Revista APPLIED SCIENCES					
Volumen		Número		Páginas	
11		5		2278	
Recibido		Aceptado		Publicado	
12 de febrero de 2021		2 de marzo de 2021		4 de marzo de 2021	
DOI	10.3390/app11052278			Veces citado	10
Indicio de calidad	2021 JOURNAL IMPACT FACTOR (JIF):			2.838	
Categoría		Rango JIF	Cuartil JIF	Percentil JIF	
Chemistry, multidisciplinary		90/224	Q2	60,04	
Materials science, multidisciplinary		195/414	Q2	53,02	
Physics, applied		75/178	Q2	58,15	
Engineering, multidisciplinary		63/175	Q2	59,23	

1. Referencia (autores, título): Uceda-Rodríguez, M., López-García, A. B., Moreno-Maroto, J. M., Cobo-Ceacero, C. J., Cotes-Palomino, M. T., & Martínez García, C. Evaluation of the environmental benefits associated with the addition of olive pomace in the manufacture of lightweight aggregates
2. Breve resumen: A Life Cycle Assessment (LCA) using SimaPro software has been carried out concerning the manufacture of artificial lightweight aggregates (LWAs). The study aims to evaluate the changes in the environmental impact when an additive of residual origin, specifically olive pomace (OP), is added following the principles of the Circular Economy. This residue (commonly known as alperujo) was used as a substitute for clay in 1.25, 2.5 and 5 wt%. The environmental impact related to the use of olive pomace in the mixture was estimated using the CML 2000 methodology, yielding improvements of 3.8%, 7.7% and 15.3% for 1.25, 2.5 and 5 wt% OP added, respectively. Optimum addition results are in the range of 1.25 and 2.5 wt% OP. In this way, the reduction of emissions associated with LWA manufacture would be favored without negatively affecting the technological properties of the resulting material.
3. Fecha de publicación: 4 de marzo de 2021
4. Estado: Publicado
5. Tipo de publicación: Artículo científico
6. Categoría: Metallurgy & Metallurgical Engineering; Materials Science, Multidisciplinary; Physics, Condensed Matter; Chemistry, Physical; Physics, Applied
7. Ubicación: Suiza
8. Otros datos de interés: Artículo Q2 de JCR. DOI: 10.3390/app11052278

CAPÍTULO VI

Evaluación comparativa del ciclo de vida de los áridos ligeros fabricados a partir de residuos: Aplicación de la Economía Circular

Tabla 31. Información de la tercera publicación

Revista APPLIED SCIENCES							
Volumen		Número		Páginas			
12		4		1917			
Recibido		Aceptado		Publicado			
6 de diciembre de 2021		10 de febrero de 2022		12 de febrero de 2022			
DOI 10.3390/app12041917			Veces citado 4				
Indicio de calidad		2021 JOURNAL IMPACT FACTOR (JIF):		2.838			
Categoría		Rango JIF		Cuartil JIF		Percentil JIF	
Chemistry, multidisciplinary		90/224		Q2		60,04	
Materials science, multidisciplinary		195/414		Q2		53,02	
Physics, applied		75/178		Q2		58,15	
Engineering, multidisciplinary		63/175		Q2		59,23	

1. Referencia (autores, título): López-García, A. B., Cotes-Palomino, T., Uceda-Rodríguez, M., Moreno-Maroto, J. M., Cobo-Ceacero, C. J., Andreola, N. M., & Martínez-García, C. Application of Life Cycle Assessment in the Environmental Study of Sustainable Ceramic Bricks Made with 'alperujo' (Olive Pomace)
2. Breve resumen: The application of Life Cycle Assessment in the construction sector can be a very useful tool to reduce the environmental impact generated by the sector. In order to quantify the improvement in environmental terms with the use of artificial lightweight aggregates (LWA) manufactured with waste, in this work, we conducted a comparative evaluation of the life cycle of LWAs for a total of five different scenarios: LWAs obtained in a traditional way, i.e., using exclusively clay in their manufacture (Spanish blond clay, Portuguese red clay and Portuguese blond clay), and LWAs manufactured with four different wastes, with a partial substitution of 2.5% for each of the clays per waste (almond and hazelnut shells, sludge from the purification of paper money, cork dust and coffee grounds). The functional unit was set as the production of 1 kilo of lightweight aggregates and the CML 2000 methodology and the SimaPro software were used. The results obtained in this research allow us to conclude that the addition of organic wastes showed a slightly higher environmental performance than the conventional system, the ALAs manufactured with almond and hazelnut shells being the most environmentally friendly option, with reductions of more than 30% in some cases, followed by the LWAs manufactured with coffee grounds. On the other hand, the addition of paper sewage sludge and cork dust represents minimal environmental optimization.
3. Fecha de publicación: 12 de febrero de 2022
4. Estado: Publicado
5. Tipo de publicación: Artículo científico
6. Categoría: Chemistry, multidisciplinary; Materials Science, Multidisciplinary; Physics, Applied; Engineering, multidisciplinary
7. Ubicación: Suiza
8. Otros datos de interés: Artículo Q2 de JCR. DOI: 10.3390/app12041917

CAPÍTULO VII

Transformación ecoeficiente de residuos de lana mineral en áridos ligeros a baja temperatura de sinterización y evaluación medioambiental asociada alperujo

Tabla 37. Información de la cuarta publicación

Revista CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS				
Volumen		Número		Páginas
345		-		128294
Recibido		Aceptado		Publicado
20 de mayo de 2022		28 de junio de 2022		9 de julio de 2022
DOI	10.1016/j.conbuildmat.2022.128294			Veces citado -
Indicio de calidad	2019 JOURNAL IMPACT FACTOR (JIF):			7.693
Categoría	Rango JIF	Cuartil JIF	Percentil JIF	
Construction & building technology	6/68	Q1	91,91	
Engineering, civil	5/138	Q1	96,74	
Materials science, multidisciplinary	76/345	Q1	78,12	

1. Referencia (autores, título): López-García, A. B., Uceda-Rodríguez, M., Leon-Gutierrez, S., Cobo-Ceacero, C. J. & Moreno-Maroto, J. M. (2021). Eco-efficient transformation of mineral wool wastes into lightweight aggregates at low firing temperature and associated environmental assessment
2. Breve resumen: Waste recycling is one of the key elements to mitigate the environmental problems that threaten our society. Mineral wool is currently the most widely used insulation material in the European Union, so the amount of waste generated in the demolition and restoration of buildings has increased alarmingly. This work investigates for the first time the use of glass wool (GW) and rock wool (RW) as a component in the manufacture of lightweight aggregates, showing that both can be suitable raw materials considering the density (1.3–1.5 g/cm³) and mechanical strength (2–6 MPa) obtained. In addition, the use of GW would help to reduce the firing temperature significantly (700 °C) compared to that normally used in the manufacture of these materials (around 1200 °C), which would imply significant energy savings. Considering that thermal insulation materials and lightweight aggregates are among the most widely used materials in the construction sector, the work presented here also evaluates the environmental impact associated with the manufacture of lightweight aggregates with RW and GW in comparison with the traditional process, using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology. A significant environmental improvement has been observed in almost all the analyzed impact categories of the artificial aggregates manufactured with mineral wool with respect to traditional LWAs.
3. Fecha de publicación: 9 de julio de 2022
4. Estado: Publicado
5. Tipo de publicación: Artículo científico
6. Categoría: Construction & building technology; Engineering, civil; Physics Materials science, multidisciplinary
7. Ubicación: Suiza
8. Otros datos de interés: Artículo Q1 de JCR. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128294

CAPÍTULO VIII

Conclusiones

CONCLUSIONES

La sociedad está avanzando rápidamente hacia un punto de no retorno y solo mediante la adopción de cambios significativos podremos evitar que esto suceda. La economía circular supone un paradigma multidisciplinar que permite detener la explotación masiva de recursos naturales y presentar alternativas de reciclaje, reutilización y recuperación válidas y viables para el consumo futuro de la humanidad. En este giro de sentido, conocer que impacto tienen nuestros actos sobre el medioambiente y las consecuencias que se prevén, resulta de vital importancia si queremos ir con pie firme y no buscar soluciones tardías a problemas evitables. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) representa una potente herramienta para evaluar los impactos ambientales y posibles efectos previsibles, dándonos la oportunidad de proponer alternativas y sus resultados esperables.

Con la idea en mente, este capítulo resume los aportes más significativos realizados en esta tesis doctoral en relación con el estudio ambiental realizado a materiales de la construcción ideados bajo el paraguas de la economía circular frente a sus alternativas tradicionales u ordinarias que nos rodean en nuestro día a día.

La industria cerámica es productora de un elevado impacto ambiental debido a todo su ciclo productivo. Desde etapas tempranas de extracción de materia prima en las que se consume cantidades elevadas de recursos naturales, pasando por las emisiones de transportar este material, hasta las altas temperaturas requeridas para conformar el material resultante. Todo esto sin contar la deposición final de un producto, aunque inerte, es pesado y voluminoso.

En resumen, el análisis de ciclo de vida es una herramienta útil y completa para evaluar el impacto ambiental de un producto o servicio a lo largo de su ciclo de vida completo. Este análisis permite identificar y cuantificar las diferentes etapas del ciclo de vida que contribuyen significativamente al impacto ambiental del producto o servicio, así como las áreas de mejora y las oportunidades para reducir el impacto ambiental. Cabe destacar una serie de puntos clave sobre la metodología a los que se ha podido concluir de manera general tras las investigaciones realizadas:

- Los resultados del ACV pueden ser utilizados para tomar decisiones informadas sobre el diseño, la fabricación, el transporte y el uso de un producto, con el objetivo de minimizar su impacto ambiental y mejorar su sostenibilidad. Además, el ACV puede ser utilizado para comparar diferentes productos y seleccionar aquellos que tienen un menor impacto ambiental.
- Es importante destacar que el ACV no es una herramienta perfecta, y presenta ciertas limitaciones y desafíos. Entre ellos, destacan la

disponibilidad y calidad de los datos, la complejidad de los sistemas y la dificultad para comparar productos o servicios de diferentes sectores o que no presentan una unidad funcional similar que altera de forma significativa la magnitud de los resultados.

- A pesar de estas limitaciones, el ACV sigue siendo una herramienta valiosa para evaluar y mejorar la sostenibilidad de los productos, incluso servicios, y su uso está cada vez más extendido en diferentes sectores y países.

En definitiva, el análisis de ciclo de vida se presenta como una herramienta esencial para avanzar hacia un modelo de producción y consumo más sostenible y responsable con el medio ambiente.

El ACV realizado en esta investigación examina el sistema de producción de ladrillos y áridos ligeros artificiales que incorporan residuos industriales desde la cuna hasta la puerta y los compara a su vez con productos fabricados de forma tradicional carentes de aditivos. Para lograr este objetivo, se ha establecido una unidad funcional de un kilo de ladrillos/áridos producidos en los que se han variado los residuos incorporados y las condiciones de sinterización. Nos hemos apoyado en el software SimaPro en su versión 8.3 y de la base de datos Ecoinvent junto con los valores experimentales obtenidos en laboratorio. Se siguieron las directrices de la norma ISO 14040. La metodología de cálculo empleada ha sido CML 2000 por su amplia gama de categorías de impacto capaces de cubrir una amplia gama tanto de aspectos como la salud humana, los recursos naturales, el medio ambiente y el entorno artificial. La metodología IPCC también se ha utilizado como método de validación de resultados en algunos casos.

En conclusión, el presente trabajo de investigación ha ampliado la comprensión del impacto medioambiental que presentan los ladrillos y áridos ligeros artificiales. A través del análisis de ciclo de vida y el examen de los datos del inventario junto con los resultados obtenidos, se ha logrado alcanzar los objetivos y responder a las preguntas de investigación planteadas. Los hallazgos presentados en este estudio destacan la importancia de emplear los residuos como punto clave para obtener nuevos tipos de materiales que mejoren las prestaciones de los tradicionales. A continuación, se recogen las principales conclusiones que se desligan del trabajo realizado:

- El análisis global realizado a los ladrillos que incorporan un 3, 7 y 10% de alpeorujo muestra que los beneficios de la incorporación del orujo de oliva a los ladrillos son muy limitados. A pesar de que dichas incorporaciones se tradujeron en beneficios ambientales en algunas de las distintas etapas analizadas, destacando la de materias primas y extracción al requerir una

menor cantidad de material arcilloso que cubre el residuo añadido, las etapas de transporte y fabricación compensaron las anteriores. La fase menos beneficiada sería la fabricación. Esto se debe en mayor medida a las emisiones atmosféricas que se producen durante la descomposición térmica de las materias primas empleadas, así como a la alta demanda energética necesaria en el proceso de secado, pero sobre todo el de sinterización. Para la huella de carbono, la adición del alpeorujó incrementaba la importancia de esta etapa desde el 90% del escenario tradicional hasta un 92, 93 y 94% para las mezclas con 3, 7 y 10% de residuo en peso, respectivamente. No obstante, incorporar las cantidades dadas de orujo de oliva supone una ligera disminución del impacto ambiental en todas las categorías ambientales excepto en «Potencial de Calentamiento Global».

- Por otra parte, el resto de ACV realizados en esta investigación ha examinado el impacto ambiental de la fabricación de áridos ligeros cuando se añaden diferentes proporciones de residuos a las mezclas de arcilla, comparando estos resultados con los obtenidos con la arcilla sin residuos.

La reducción del impacto ambiental de los áridos con alpeorujó respecto a los tradicionales se data en 3,8%, 7,7% y 15,3% para 1,25, 2,5 y 5 % en peso de residuo añadido, respectivamente, teniendo en cuenta una valoración global de los resultados entre las diferentes categorías analizadas. Si nos centramos en la huella de carbono, las mezclas con una proporción de aditivo cercanas y superiores al 5 % en peso supondrían un impacto negativo en comparación con los áridos sin residuos, dado que la combustión del aditivo está directamente asociada a un aumento de las emisiones de GEI. Un margen óptimo de sustitución sería de entre el 1,25 y 2,5% en peso, con el que se conseguiría reducir hasta un 8% las emisiones de carbono a la atmósfera, sin repercutir de manera negativa en las propiedades tecnológicas del material resultante.

- Además del anterior, también se estudiaron áridos con una sustitución parcial de otros cuatro residuos orgánicos como es la cáscara de frutos secos, lodos de depuradora de papel, polvo de corcho y posos de café, donde se obtuvieron mejoras leves con respecto al tradicional.

La cáscara de almendra y avellana resultó ser la opción que menos impacto tendría sobre el medio ambiente. Las reducciones de dicho impacto rondaban el 15%, con casos singulares superiores al 30% para unas mezclas concretas. El uso de este residuo, junto con los posos de café,

mostraron ser los más sostenibles de cara a reducir la huella de carbono en la fabricación de materiales cerámicos en condiciones de sinterización a altas temperaturas y tiempos reducidos. La adición de lodos de depuradora de papel y polvo de corcho de papel solo mostraron mejoras insignificantes a pesar de su elevado poder exotérmico, con valores máximos que apenas alcanzan una mejora del 3%.

- Los dos residuos inorgánicos que se incorporaron fueron la lana mineral y de vidrio. A pesar de la falta de plasticidad de la lana mineral, se pudo peletizar con la adición de un 20 % en peso de subproductos ricos en sepiolita. Este inconveniente técnico no afectó en las propiedades tecnológicas del material resultante con características análogas a las de los áridos ligeros comerciales en cuanto a densidad, porosidad, capacidad de absorción de agua y resistencia mecánica. Desde el punto de vista medioambiental, la incorporación de ambos residuos presenta una mejora generalizada en todas las categorías de impacto en comparación con los áridos tradicionales. De los dos, la lana de vidrio mostró ser la opción con mejor impacto sobre el medioambiente con un 60% de reducción del impacto en el caso más beneficioso.

La construcción es uno de los sectores que más contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero y, por tanto, uno de los focos principales donde poder plantear actuaciones y cambios que puedan reducir el impacto de su huella en el medioambiente. Los resultados obtenidos de este estudio soportan la hipótesis de que la sustitución de parte de la arcilla por nutrientes tecnológicos como los residuos industriales puede representar un método válido, viable y respetuoso con el ecosistema. De esta forma, no solo se mejoraría la gestión de dichos residuos, sino que podría contribuir a impulsar la producción en aquellos territorios fuertemente ligados a la industria cerámica, de la construcción y agroalimentaria, y el nuevo empleo que ello implicaría.

Para finalizar, se ha podido demostrar que herramientas tales como el Análisis de Ciclo de Vida proporcionan una vista objetiva y funcional de los impactos que generan las actividades con fuertes demandas energéticas en el medio ambiente, y la versatilidad que nos permite anticiparlos para actuar en consecuencia. Con eso no solo conseguimos conocer su comportamiento, sino también optimizar procesos y plantear alternativas. La concienciación en sostenibilidad, cada vez más asentada en la sociedad, abre una puerta hacia el cambio necesario que debemos impulsar a través de la ingeniería circular.

ANEXOS

ANEXO A

Glosario de términos

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Terminología utilizada en la evaluación del ciclo de vida definida por ISO (ISO, 14040, 2006; ISO, 14041, 1998; ISO, 14042, 2000; ISO, 14043, 2000; ISO, 14044, 2006) y SETAC Europa (SETAC-Europe, 1992; Heijungs, R.; Hofstetter, P., 1996).

Afirmación comparativa (<i>Comparative assertion</i>)	Alegación medioambiental relativa a la superioridad o equivalencia de un producto frente a otro producto competidor que desempeñe la misma función.
Análisis de incertidumbre (<i>Uncertainty analysis</i>)	Un procedimiento sistemático para determinar y cuantificar la incertidumbre introducida en los resultados de un ICV debido a los efectos acumulativos de la incertidumbre de entrada y la variabilidad de los datos. Utiliza rangos o distribuciones de probabilidad para determinar la incertidumbre en los resultados.
Análisis de inventario del ciclo de vida (<i>Life cycle inventory analysis</i>)	Fase de evaluación del ciclo de vida que incluye la compilación y cuantificación de los insumos y productos de un determinado sistema de productos a lo largo de todo su ciclo de vida.
Análisis de sensibilidad (<i>Sensitivity analysis</i>)	Procedimiento sistemático para estimar los efectos sobre el resultado de un estudio de los métodos y datos elegidos y su incertidumbre.
Análisis del ciclo de vida, ACV (<i>Life Cycle Analysis, LCA</i>) o Evaluación de Ciclo de Vida (<i>Life Cycle Assessment</i>)	Recopilación y evaluación de las entradas, salidas e impactos ambientales potenciales de un sistema de productos a lo largo de su ciclo de vida.
Áreas de protección, AoP (<i>Areas of protection</i>)	Valores sociales amplios con respecto a la política medioambiental (<i>por ejemplo, salud humana, salud ecológica, biodiversidad, bienestar material intergeneracional, valores estéticos</i>). Las áreas de medio ambiente que se supone que están protegidas contra las emisiones y vertidos nocivos. En algunas metodologías se consideran las mismas que las categorías de puntos finales. Sin embargo, se puede hacer una distinción entre las categorías de daños en los parámetros y las Áreas de protección, es decir, un AoP es un tipo de parámetros que representa un valor y una preocupación social, tales como: la salud humana, el medio ambiente natural, los recursos naturales y el medio

ambiente creado por el hombre; mientras que una categoría de daños en los parámetros es una variable de esa preocupación social, por lo que se consideran como una representación cuantificable del AoP.

Asignación (<i>Allocation</i>)	Partición de los flujos de entrada o salida de un proceso al sistema de producto en estudio.
Aspecto ambiental (<i>Environmental aspect</i>)	Elemento de las actividades, productos o servicios de una organización que puede interactuar con el medio ambiente.
Calidad de los datos (<i>Data quality</i>)	Naturaleza o características de los datos recogidos o integrados.
Caracterización (<i>Characterization</i>)	Segundo paso dentro de la fase de Evaluación de Impacto de un estudio ACV que sucede al elemento de clasificación y precede a la valoración, en la que se realiza el análisis/cuantificación y la agregación de los impactos dentro de las categorías de impacto elegidas. La contribución relativa de cada insumo y producto dentro del sistema de productos se asigna a categorías de impacto y se convierte en indicadores que representan los correspondientes impactos potenciales sobre el medio ambiente. Los resultados obtenidos en la fase de clasificación se multiplican por los factores de caracterización de cada sustancia dentro de cada categoría de impacto.
Categoría de datos (<i>Data category</i>)	División clasificatoria de los flujos de entrada y salida de un proceso unitario o sistema de productos.
Categoría de impacto (<i>Impact category</i>), o tipo de problema, problema ambiental, tema ambiental, etc.	Nivel elegido en la cadena causa-efecto del tipo de efecto ambiental considerado, relacionado de alguna manera con las áreas a proteger. El perfil de puntuación de impacto proporciona las puntuaciones para las categorías de impacto.
Categorías de daños « <i>de punto final</i> »* (<i>Damage categories «endpoint categories»</i>)	Las categorías ambientales a través de las cuales se modelan las emisiones y liberaciones de una sustancia al medio ambiente hasta el efecto nocivo sobre los aspectos ambientales. Las categorías de daños también se pueden llamar categorías de impacto, dependiendo del estudio requerido. Sin embargo, la terminología de las categorías de impacto y de daños tiene que estar claramente definida en un estudio específico.

Categorías de impacto «de punto medio» (<i>Impact categories «midpoint categories»</i>)	Las categorías ambientales a través de las cuales se modelan las emisiones y liberaciones de una sustancia al medio ambiente hasta los cambios en los aspectos medioambientales naturales.
Ciclo de vida (<i>Life cycle</i>)	Etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema de productos, desde la adquisición de materia prima o generación de recursos naturales hasta la disposición final.
Clasificación (<i>Classification</i>)	Primer elemento de la evaluación de impacto, que atribuye las intervenciones ambientales enumeradas en la tabla del inventario a una serie de categorías de impacto seleccionadas.
Co-producto (<i>Co-product</i>)	(Co- Cualquiera de los dos o más productos que provienen del mismo proceso de la unidad.
Conclusiones y recomendaciones (<i>Conclusions and recommendations</i>)	Las conclusiones resumen la identificación y evaluación de los problemas ambientales significativos. Las recomendaciones son aquellas características que surgen directamente de las conclusiones, dado el objetivo del estudio.
Definición del objetivo y alcance (<i>Goal and scope definition</i>)	Actividad que inicia un ACV, definiendo su propósito, límites, limitaciones, líneas principales y procedimientos.
Diagrama de flujo del proceso (<i>Process flow diagram</i>)	Tabla que contiene las cajas de etiquetas conectadas por líneas con flechas direccionales para ilustrar el proceso o subsistema de la unidad incluido en el sistema del producto y las interrelaciones entre esos procesos de la unidad.
Diferenciación espacial (<i>Spatial differentiation</i>)	La diferenciación espacial significa que los diferentes modelos y criterios utilizados en la etapa de evaluación de impacto para la caracterización, normalización y ponderación dentro de cada metodología del EICV dependen de las regiones. Por esta razón, algunas metodologías del EICV tienen más de una versión que considera la diferenciación espacial (<i>como la metodología EDIP 2003</i>). La diferenciación espacial se puede hacer a nivel de continentes y países. En una metodología EICV, cuando los modelos ambientales se desarrollan de acuerdo a una región determinada, entonces la validez regional de la metodología con sus categorías de impacto y daño pasa a estar dentro de la región correspondiente para la que se desarrolló la metodología. Sin embargo, algunas categorías

son de interés mundial, no solo regional, como el agotamiento de la capa de ozono, el cambio climático y los recursos.

Efecto (<i>Effect</i>)	Un cambio específico en la salud humana, en el ecosistema o en la situación de los recursos globales como consecuencia de un impacto específico.
Energía de materia prima (<i>Feedstock energy</i>)	Calor bruto de combustión de los insumos de materia prima, que no se utilizan como fuente de energía, a un sistema de productos.
Energía de proceso (<i>Process energy</i>)	Insumo de energía requerido en un proceso unitario para operar el proceso o equipo dentro del proceso, excluyendo la producción y entrega de energía.
Entrada (<i>Input</i>)	Material o energía que entra en un proceso unitario - el material puede incluir materias primas y productos.
Entrada auxiliar (<i>Ancillary input</i>)	Insumo de material que es utilizado por el proceso unitario que produce el producto, pero que no se utiliza directamente como parte del producto.
Evaluación (<i>Evaluation</i>)	Es el segundo paso dentro de la interpretación del ciclo de vida, incluyendo la verificación de integridad, la verificación de sensibilidad, la verificación de consistencia y otras verificaciones.
Evaluación de impacto (<i>Impact assessment</i>)	Proceso cuantitativo y/o cualitativo para caracterizar y evaluar los efectos de las intervenciones ambientales identificadas en el cuadro del inventario. El componente de evaluación de impacto consiste en principio en los tres o cuatro elementos siguientes: clasificación, caracterización (<i>normalización</i>) y valoración.
Evaluación del impacto del ciclo de vida, EICV (<i>Life cycle impact assessment</i>)	Fase de evaluación del ciclo de vida destinada a comprender y evaluar la magnitud y la importancia de los posibles impactos ambientales de un sistema de productos.
Factor de caracterización (<i>Characterization factor</i>) o factor de exposición,	Factor que expresa la contribución de una intervención ambiental unitaria (<i>como la emisión atmosférica de 1 kg de</i>

factor de efecto, agente de efecto de exposición, factor de equivalencia, etc.	CFC-11) a las categorías de impacto elegidas (<i>como el calentamiento global y el agotamiento de la capa de ozono</i>).
Factor de valoración (<i>Valuation factor</i>)	Factorizar el elemento de evaluación transformando el perfil de puntuación de impacto en un índice ambiental.
Flujo de energía (<i>Energy flow</i>)	Flujo de entrada o flujo de salida de un proceso unitario o sistema de producto medido en unidades de energía.
Flujo elemental (<i>Elementary flow</i>)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Material o energía que entra en el sistema estudiado, que ha sido extraído del medio ambiente sin transformación humana previa. 2. Material o energía que sale del sistema estudiado, que se desecha en el medio ambiente sin transformación humana posterior.
Impacto (<i>Impact</i>)	Las consecuencias para la salud, para el bienestar de la flora y la fauna o para la disponibilidad futura de recursos naturales, atribuibles a las corrientes de entrada y salida de un sistema.
Impacto vs. efecto (<i>Impact vs. effect</i>)	La mayoría de los problemas ambientales tratados en los métodos actuales de caracterización se cuantifican al nivel de los impactos ambientales (<i>por ejemplo, formación de ozono, deposición de H⁺, agotamiento de la capa de ozono, aumento del forzamiento de radiaciones</i>). Los efectos ambientales son los puntos finales elegidos dentro de estas cadenas de impacto (<i>por ejemplo, reducción de la salud humana, reducción del crecimiento de los cultivos, muerte de las plantas, reducción de la mortalidad de los animales, biodiversidad, etc.</i>). Esto significa que todos los pasos de la cadena causa-efecto son impactos, mientras que los efectos son los puntos finales elegidos.
Indicador (<i>Indicator</i>)	Una simplificación y destilación de información compleja que pretende ser una descripción resumida de las condiciones o tendencias para ayudar en la toma de decisiones.
Índice ambiental (<i>Environmental index</i>)	Puntuación resultante que representa la nocividad percibida para el medio ambiente, obtenida mediante ponderación cuantitativa como resultado del elemento de valoración.

Interpretación del ciclo de vida (<i>Life cycle interpretation</i>)	Fase de la evaluación del ciclo de vida en la que se combinan los resultados del análisis del inventario o de la evaluación del impacto, o de ambos, de acuerdo con el objetivo y alcance definidos, a fin de llegar a conclusiones y recomendaciones.
Intervención ambiental (<i>Environmental intervention</i>)	Intercambio entre la atmósfera (la «economía») y el medio ambiente, incluyendo el uso de recursos, emisiones a la atmósfera, agua o suelo.
ISO	Organización Internacional de Normalización (<i>International Organization for Standardization</i>).
Liberación de fugitivos (<i>Fugitive releases</i>)	Emisiones incontroladas al aire, al agua o al suelo.
Límite del sistema (<i>System boundary</i>)	Interfaz entre un sistema de productos y el medio ambiente u otros sistemas de productos.
Materia prima (<i>Raw material</i>)	Material primario o secundario que se utiliza para fabricar un producto.
Medio ambiente (<i>Environment</i>)	Todo el entorno y las condiciones en las que operan y se interrelacionan los individuos, las poblaciones y las organizaciones. El entorno incluye aire, agua, tierra, recursos naturales, flora, fauna y seres humanos, y se extiende desde la ubicación de una organización hasta el sistema global.
Metodología EICV (<i>LCIA methodology</i>)	Metodologías de Evaluación o Análisis de Impacto del Ciclo de Vida, o pueden llamarse también metodologías de análisis de impacto (<i>Life Cycle Impact Assessment methodologies</i>).
Modelización «de punto final» (<i>Endpoint modelling</i>)	Una técnica de modelización del impacto de una determinada sustancia sobre el medio ambiente hasta el efecto nocivo sobre los aspectos ambientales.
Modelización «de punto medio» (<i>Midpoint modelling</i>)	Una técnica de modelización del impacto de una determinada sustancia en el medio ambiente hasta los cambios en los aspectos ambientales.
Normalización (<i>Normalisation</i>)	Un elemento opcional que viene después del paso de caracterización dentro de una fase de Evaluación de Impacto de un estudio ACV. La suma de los resultados de cada indicador de categoría se divide por un valor de

referencia. Por lo tanto, la normalización se expresa de manera que los indicadores de impacto puedan ser comparados entre sí. La situación de referencia puede diferir según la categoría de impacto, y es la contribución de un cierto período de tiempo al tipo de problema en cuestión. La normalización da como resultado un perfil de puntuación de impacto normalizado que consiste en puntuaciones de impacto normalizadas.

Parte interesada (<i>Interested party</i>)	Persona o grupo interesado o afectado por el comportamiento medioambiental de un sistema de productos o por los resultados de la evaluación del ciclo de vida.
Perfil de puntuación de impacto (<i>Impact score profile</i>) o perfil ambiental	Lista de puntuaciones de impacto para todas las categorías de impacto.
Practicante (<i>Practitioner</i>)	Individuo o grupo de personas que realiza una evaluación del ciclo de vida.
Problema ambiental (<i>Environmental issue</i>)	Insumos y productos (<i>resultados del ICV</i>) y -si se llevan a cabo adicionalmente- indicadores ambientales (<i>resultados de la EICV</i>), que se definen en términos generales como importantes en la definición del objetivo y alcance.
Producción y suministro de energía (<i>Production and delivery of energy</i>)	La entrada de energía en los procesos que extraen, generan, procesan, refinan y suministran energía de proceso.
Producto final (<i>Final product</i>)	Producto que no requiere ninguna transformación adicional antes de su uso.
Producto intermedio (<i>Intermediate product</i>)	Entrada o salida de un proceso unitario que requiere una transformación adicional.
Puntuación de impacto (<i>Impact score</i>)	Contribución de un sistema de productos a una categoría de impacto.
Reciclaje, circuito abierto (<i>Recycling, open loop</i>)	Recuperación de material, pero no en la misma fábrica que produjo el material. Este tipo de recuperación requiere una recogida centralizada de material usado.

Reciclaje, circuito cerrado (<i>Recycling, closed loop</i>)	Recuperación de material en la misma fábrica que produjo el material. Este tipo de recuperación requiere un acuerdo de «recuperación».
Recurso abiótico (<i>Abiotic resource</i>)	Objeto que puede ser extraído del medio ambiente para que sirva como insumo para el sistema del producto, y que se distingue de un recurso biótico por su naturaleza no viviente.
Recurso biótico (<i>Biotic resource</i>)	Objeto que puede ser extraído del medio ambiente para que sirva como insumo para el sistema de productos, y que se distingue de un recurso abiótico por su naturaleza viva.
Residuo (<i>Waste</i>)	Cualquier salida del sistema de producto que se elimine.
Resultados ICV (<i>LCI results</i>)	Resultados del Inventario del Ciclo de Vida, o se puede llamar también resultados del inventario (<i>Life Cycle Inventory results</i>).
Salida (<i>Output</i>)	Material o energía que sale de un proceso unitario - el material puede incluir materias primas, productos, emisiones y residuos.
Sistema de producto (<i>Product system</i>)	Colección de procesos unitarios conectados, material y energéticamente, que realizan una o más funciones definidas (<i>en la norma ISO, el término «producto» utilizado por sí solo no solo incluye los sistemas de productos, sino que también puede incluir los sistemas de servicio</i>).
Tabla de inventario (<i>Inventory table</i>)	Lista de entidades ambientales añadidas y extraídas del medio ambiente (<i>intervenciones ambientales</i>) a través de acciones económicas que son causadas directamente por procesos dentro de un sistema de productos. Es el resultado principal del análisis de inventario.
Transparencia (<i>Transparency</i>)	Presentación abierta, completa y comprensible de la información.
Unidad de proceso (<i>Unit-process</i>)	La parte más pequeña de un sistema de productos cuyos datos se recogen al realizar una evaluación del ciclo de vida.
Unidad funcional (<i>Functional unit</i>)	Rendimiento cuantificado de un sistema de productos para su uso como unidad de referencia en un estudio de evaluación del ciclo de vida.

Valoración/ponderación (<i>Valuation/Weighting</i>)	Último elemento de la evaluación de impacto que sigue al elemento de caracterización/normalización, en el que los resultados de esta, en particular las puntuaciones de impacto (normalizadas), se ponderan entre sí de forma cuantitativa y/o cualitativa para poder hacer que la información de impacto sea más fácil de tomar decisiones, es decir, es el proceso de convertir los resultados de los indicadores normalizados de las diferentes categorías de impacto utilizando factores numéricos (<i>factores de ponderación</i>) basados en valoraciones subjetivas. Estos factores de ponderación dependen de la incorporación de factores sociales, políticos y éticos. Los resultados obtenidos en la fase de normalización se multiplican por los factores de ponderación de cada sustancia dentro de cada categoría de impacto. Se trata de un elemento que implica necesariamente valoraciones cualitativas o cuantitativas que no se basan únicamente en las ciencias naturales. <i>Por ejemplo</i> , los valores políticos y/o éticos pueden utilizarse en este elemento. La valoración puede dar lugar a un índice medioambiental.
Verificación de consistencia (<i>Consistency check</i>)	de Proceso de verificación de que la interpretación se realiza de acuerdo con la definición del objetivo y alcance, antes de llegar a las conclusiones.
Verificación de integridad (<i>Completeness check</i>)	de Proceso de verificación de que la información de las diferentes fases (análisis de inventario, evaluación del impacto del ciclo de vida) es suficiente para que la interpretación permita llegar a conclusiones.

ANEXO B

Etapas de ACV

ETAPAS DE ACV

Todo ACV que cumpla con la norma ISO 14040, debe seguir una serie de etapas preestablecidas como son la definición del objetivo y alcance, el análisis de inventario, la evaluación del impacto e interpretación de resultados. A continuación, procederemos a analizar cada una de estas fases.

B.1 Definición del objetivo y alcance

La definición del objetivo y del alcance es la primera fase de una evaluación del ciclo de vida que contiene las siguientes cuestiones principales de acuerdo con la **Error! Reference source not found.**

B.1.1 *Objetivo*

La determinación del propósito de la evaluación del ciclo de vida es una parte fundamental de la definición del objetivo.

El objetivo de un estudio de ACV deberá establecer sin ambigüedad la aplicación prevista, incluidas las razones para llevar a cabo el estudio y el público al que va dirigido, es decir, a quien se pretende comunicar los resultados del estudio.

La determinación del objetivo también tiene que definir el uso previsto de los resultados y los usuarios que los utilizan. El especialista, que tiene que alcanzar el objetivo, necesita entender el propósito detallado del estudio para poder tomar las decisiones adecuadas durante todo el proceso del mismo. Ejemplos de objetivos de una evaluación del ciclo de vida son:

- Comparar dos o más productos diferentes que cumplan la misma función con el fin de utilizar la información en la comercialización de los productos o regular el uso de los mismos.
- Determinar las posibilidades de mejora en el desarrollo futuro de los productos existentes o en la innovación y el diseño de nuevos productos.
- Identificar áreas, etapas, etc. en el ciclo de vida de un producto en las que pueden establecerse pautas como parte de los criterios de ecoetiquetado que deben ser utilizados, por ejemplo, por el comité de ecoetiquetado.

La definición del objetivo determina el nivel de sofisticación del estudio y los requisitos para la presentación de informes. La transparencia es esencial para todo tipo

de estudios de ACV. El grupo objetivo del estudio de ACV también es importante a la hora de elegir el método de trabajo.

El objetivo puede redefinirse como resultado de los hallazgos a lo largo del estudio, por ejemplo, como parte de la interpretación (Astrup Jensen, y otros, 1997).

B.1.2 Alcance

La definición del alcance de la evaluación del ciclo de vida establece los límites de la evaluación: qué se incluye en el sistema y qué métodos de evaluación detallados se utilizarán. Al definir el alcance de un estudio de ACV, se considerarán y describirán claramente los siguientes puntos:

- las funciones del sistema o, en el caso de los estudios comparativos, de los sistemas
- la unidad funcional
- el sistema que se va a estudiar
- los límites del sistema
- procedimientos de asignación
- los tipos de impacto y la metodología de la evaluación de impacto y su posterior interpretación
- la necesidad de datos
- suposiciones
- limitaciones
- los requisitos iniciales de calidad de los datos
- el tipo de revisión crítica, si la hubiera
- el tipo y formato del informe requerido para el estudio

El alcance debe estar suficientemente bien definido para asegurar que la amplitud, la profundidad y el detalle del estudio sean compatibles y suficientes para alcanzar el objetivo establecido.

El ACV es una técnica iterativa. Por lo tanto, puede ser necesario modificar el alcance del estudio mientras se lleva a cabo el mismo a medida que se recopila información adicional. Lindfors et al. resume los puntos individuales mencionados en la norma ISO 14040 en las siguientes cuestiones que se utilizarán en el procedimiento de especificación:

- categoría de productos
- alternativas estudiadas
- límites del sistema
- límites de la evaluación de impacto
- objetivos de calidad de datos

El producto o grupo de productos en cuestión debe describirse detalladamente para poder identificar las alternativas que se incluirán en el estudio. Los productos o grupos de productos alternativos también deben describirse detalladamente para poder definir los límites del sistema o sistemas. La definición de los límites de los sistemas es importante en la fase de recolección de datos porque estos determinan la cantidad de trabajo a realizar. La evaluación de impacto incluye una serie de categorías de impacto y métodos de evaluación de impacto diferentes. Los límites de la evaluación de impacto limitan el número de categorías de impacto que deben considerarse. Si es necesario, el alcance puede ser revisado durante el estudio para incluir nuevas o excluir algunas de las categorías ya elegidas. Los objetivos de calidad de los datos dependen del objetivo general del estudio e incluyen la evaluación del nivel de:

- exactitud, precisión y representatividad de los conjuntos de datos individuales (*por ejemplo, datos específicos del emplazamiento o datos medios, datos medidos o estimados, edad aceptable de los datos, etc.*)
- datos específicos dependientes de las categorías de impacto incluidas

Los objetivos de calidad de los datos pueden cambiarse durante el estudio, por ejemplo, en la fase de interpretación (Astrup Jensen, y otros, 1997).

B.1.3 Sistema de producto

El sistema de producto actúa como modelo para analizar el ciclo de vida del producto. La norma ISO 14040, define al sistema de producto como:

El conjunto de procesos unitarios conectados material y energéticamente mediante flujos elementales y flujos de productos, que realizan una o más funciones definidas.

Este concepto es de gran importancia al realizar un ACV, puesto que hay que analizar todo lo concerniente, no solo al producto en sí, sino aquellas etapas que hace posible su distribución (*como pueden ser: el embalaje, el transporte, etc.*), su correcto funcionamiento a lo largo de la vida útil del mismo (*consumibles, repuestos, energía, etc.*) y, sin olvidar, su tratamiento final (*ya sea convertido en residuos, reutilizado, reciclado, etc.*). Es decir, que se requiere una visión global del sistema del producto en su conjunto.

En aquellos productos cuya etapa de uso suponen un fuerte impacto con respecto al resto de fases, el sistema de producto adquiere una gran importancia, dado que habría que tener en consideración todos aquellos elementos que intervienen en el producto durante su vida útil. De este modo, podríamos resumir que la propiedad fundamental de un sistema de producto se caracteriza por la función del producto, y no solo por el

producto final. En la norma 14040 (ISO, 14040, 2006), podemos ver un esquema que ejemplifica un sistema de producto.

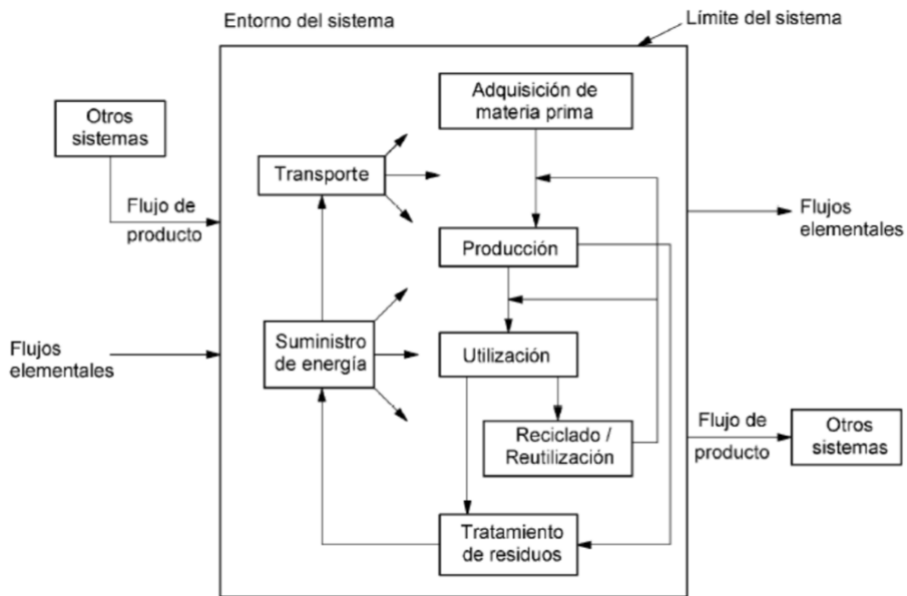


Figura 56. Ejemplo de un sistema de producto.

Los sistemas de producto se pueden subdividir en procesos unitarios, los cuales se pueden relacionar de diferentes maneras:

- entre sí, mediante flujos de productos intermedios y/o de residuos para tratamiento
- con otros sistemas de producto, mediante flujos de producto
- con el medio ambiente, mediante flujos elementales, que incluyen el uso de recursos, las emisiones al aire y los vertidos al agua y al suelo

Los datos que se producen en esta última relación formarán la base del Inventario de Ciclo de Vida (ICV) y generarán las entradas necesarias para la Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV), los cuales veremos más adelante (ism, 2018).

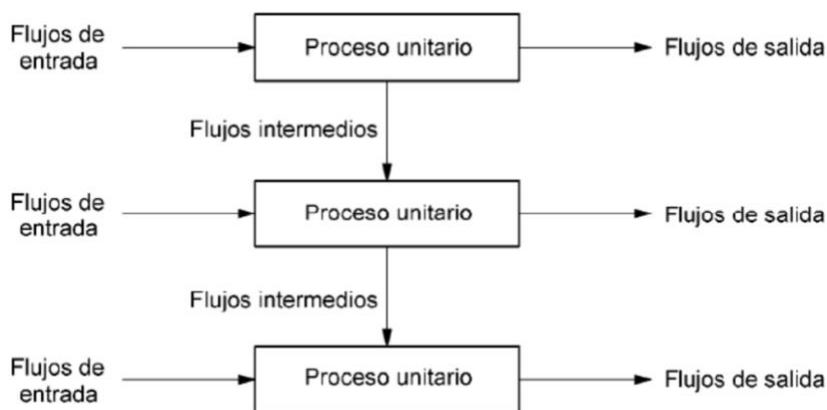


Figura 57. Conjunto de procesos unitarios dentro de un sistema de producto.

B.1.4 Unidad funcional

La definición de la unidad funcional o de las características de rendimiento es la base de un ACV porque dicha unidad funcional establece la escala para la comparación de dos o más productos, incluyendo la mejora de un producto (sistema). Todos los datos recogidos en la fase de inventario se relacionarán con la unidad funcional. Al comparar diferentes productos que cumplen la misma función, la definición de la unidad funcional es de gran importancia.

Uno de los principales objetivos de una unidad funcional es proporcionar una referencia a partir de la cual se normalizan los datos de entrada y salida. Una unidad funcional del sistema deberá estar claramente definida y ser medible. El resultado de la medición del rendimiento es el flujo de referencia.

Las comparaciones entre sistemas se realizarán sobre la base de la misma función, medida por la misma unidad funcional en forma de flujos de referencia equivalentes.

Hay que tener en cuenta tres aspectos a la hora de definir la unidad funcional (Lindfors, y otros, Nord 1995:20: Nordic guidelines on life-cycle assessment, 1995):

- la eficacia del producto
- la durabilidad del producto
- el estándar de calidad del rendimiento

Al realizar una evaluación de sistemas más complicados (*por ejemplo, sistemas multifuncionales*) se debe prestar especial atención a los subproductos.

Si en la comparación de las unidades funcionales no se tienen en cuenta funciones adicionales de uno u otro de los sistemas, estas omisiones deberán documentarse. *Por*

ejemplo, los sistemas A y B realizan las funciones x e y que están representadas por la unidad funcional seleccionada, pero el sistema A también realiza la función z que no está representada en la unidad funcional. Como alternativa, los sistemas asociados con la entrega de la función z pueden añadirse al límite del sistema B para hacer que los sistemas sean más comparables. En estos casos, los procesos seleccionados deberán estar documentados y justificados.

Los sistemas de tratamiento de residuos son un ejemplo de procesos con diferentes rendimientos (*por ejemplo, energía y fertilizantes*). Al comparar diferentes sistemas, la inclusión de la cantidad producida de energía y fertilizante es un ejemplo de manejo de diferentes subproductos en la definición de la unidad funcional. Este es también un ejemplo de cómo cambiar los límites del sistema para obtener un sistema más lógico para investigar, como es el caso del tratamiento de residuos. En dicho tratamiento de los residuos domésticos urbanos con o sin tratamiento biológico de la fracción orgánica puede considerarse un sistema de servicios. El sistema trata los residuos y produce fertilizantes biológicos (*compost a partir de la degradación aeróbica o anaeróbica de la materia orgánica*) y energéticos (*biogás a partir de la degradación anaeróbica*). Se pueden comparar diferentes sistemas incluyendo las emisiones «evitadas» de la producción de energía y fertilizantes en los escenarios que incluyen el tratamiento biológico de residuos. Como alternativa, los límites del sistema para el escenario básico, así como los escenarios alternativos, incluido el tratamiento biológico de residuos, pueden ampliarse para que todos produzcan la misma cantidad de energía y fertilizantes (Astrup Jensen, y otros, 1997).

B.1.5 Límites del sistema

Los límites del sistema definen los procesos/operaciones (*por ejemplo, procesos de fabricación, transporte y gestión de residuos*), y las entradas y salidas que deben tenerse en cuenta en el ACV. El insumo puede ser entrada general de una producción, así como la entrada de un solo proceso, y lo mismo ocurre con el insumo de la producción. La definición de los límites del sistema es una operación bastante subjetiva e incluye los siguientes límites (Lindfors, y otros, Nord 1995:20: Nordic guidelines on life-cycle assessment, 1995):

- límites geográficos
- límites o limitaciones en el ciclo de vida
- límites entre la tecnosfera y la biosfera

Debido a la subjetividad de la definición de los límites del sistema, la transparencia del proceso de definición y de los supuestos es extremadamente importante.

El límite inicial del sistema define los procesos unitarios que se incluirán en el sistema a modelar. Idealmente, el sistema de productos debería modelarse de tal manera que las entradas y salidas en su delimitación sean flujos elementales. Sin embargo, como cuestión práctica, normalmente no habrá suficiente tiempo, datos o recursos para llevar a cabo un estudio tan exhaustivo. Se deben tomar decisiones sobre qué procesos de la unidad serán modelados por el estudio y el nivel de detalle con el que se estudiarán estos procesos unitarios. No es necesario gastar recursos en la cuantificación de insumos y productos menores o insignificantes que no cambien significativamente las conclusiones generales del estudio. También se deben tomar decisiones sobre qué emisiones al medio ambiente serán evaluadas y el nivel de detalle de esta evaluación. Las reglas de decisión utilizadas para ayudar en la elección de los insumos y productos deben ser claramente entendidas y descritas. Cualquier omisión de las etapas del ciclo de vida, los procesos o las necesidades de datos debe estar claramente establecida y justificada. En última instancia, el único criterio utilizado para establecer los límites del sistema es el grado de confianza en que los resultados del estudio no se han visto comprometidos y que se ha cumplido el objetivo de un estudio determinado (*por ejemplo, el tratamiento de aguas residuales de un proceso a menudo se omite al definir los límites del sistema*) (Astrup Jensen, y otros, 1997).

B.1.6 Calidad de los datos

La calidad de los datos utilizados en el inventario del ciclo de vida se refleja naturalmente en la calidad del ACV final. La calidad de los datos puede describirse y evaluarse de diferentes maneras. Es importante que la calidad de estos se describa y evalúe de una manera sistemática que permita a los demás comprender y controlar la calidad real de los mismos. Existen una serie de recomendaciones que deben seguir los datos para cumplir con unos requisitos iniciales de calidad:

- Cobertura relacionada con el tiempo: la edad deseada (*por ejemplo, en los últimos 5 años*) y la duración mínima (*por ejemplo, anual*).
- Cobertura geográfica: área geográfica a partir de la cual deben recogerse los datos de los procesos de las unidades para satisfacer el objetivo del estudio (*por ejemplo, local, regional, nacional, continental, mundial*).
- Cobertura tecnológica: naturaleza de la combinación de tecnologías (*por ejemplo, promedio ponderado de la combinación real de procesos, mejor tecnología disponible o peor unidad operativa*).

También se tendrán en cuenta otras descripciones que definan la naturaleza de los datos recogidos en sitios específicos en comparación con los datos procedentes de fuentes publicadas, y si los datos deben medirse, calcularse o estimarse. Los datos de sitios

específicos deben ser utilizados para aquellos procesos unitarios que aportan la mayoría de los flujos de masa y energía en los sistemas estudiados, tal y como se determina en el análisis de sensibilidad. Los datos de sitios específicos también deben utilizarse para los procesos unitarios que se consideran que tienen emisiones relevantes para el medio ambiente. En los estudios, se tendría que tener en consideración los siguientes indicadores adicionales de calidad de los datos con un nivel de detalle que dependerá de la definición del objetivo y del alcance:

- **Precisión**: medida de la variabilidad de los valores de los datos para cada categoría de datos expresada (*por ejemplo, varianza*).
- **Completitud**: porcentaje de ubicaciones que comunican datos primarios a partir del número potencial existente para cada categoría de datos en un proceso unitario.
- **Representatividad**: evaluación cualitativa del grado en que el conjunto de datos refleja la verdadera población de interés (*es decir, la cobertura geográfica, temporal y tecnológica*).
- **Coherencia**: evaluación cualitativa de la uniformidad con que se aplica la metodología del estudio a los distintos componentes del análisis.
- **Reproducibilidad**: evaluación cualitativa de la medida en que la información sobre la metodología y los valores de los datos permite a un profesional independiente reproducir los resultados comunicados en el estudio.

Cuando se utilice un estudio para apoyar una afirmación comparativa que se divulgue al público, se incluirán los indicadores de calidad de los datos antes mencionados. La calidad puede describirse sistemáticamente utilizando indicadores de calidad de los datos. Cada indicador de calidad puede evaluarse utilizando una escala de, *por ejemplo*, 1 a 5, donde 1 denota la mejor calidad (*por ejemplo, un índice de calidad para un conjunto de datos puede ser [1,3,2,1,1] que indica que la precisión es alta, la integridad es media, etc.*) (Weidema B. , 1994).

La metodología para describir sistemáticamente la calidad de los datos es todavía bastante nueva. El método todavía se encuentra en fase de desarrollo para que sea más aplicable a la descripción de los diferentes datos medioambientales utilizados en una evaluación del ciclo de vida (Astrup Jensen, y otros, 1997).

B.1.7 Proceso de revisión crítica

Otros usos de las normas ambientales es aplicar la certificación de un sistema, o producto, o la acreditación del laboratorio de medición. En un ACV aún no está claro qué certificar: el estudio, el profesional individual o la compañía del profesional. Por lo tanto,

se utiliza una variación del sistema de revisión por pares utilizado en las revistas científicas, tal como se describe a continuación.

El propósito del proceso de revisión es asegurar la calidad de la evaluación del ciclo de vida. La revisión puede ser interna, externa o involucrar a las partes interesadas, tal como se especifica en la definición del objetivo y el alcance. El proceso de revisión crítica garantizará que:

- los métodos utilizados para llevar a cabo el ACV son coherentes con la norma internacional
- los métodos utilizados para llevar a cabo el ACV son científica y técnicamente válidos
- los datos utilizados son adecuados y razonables en relación con el objetivo del estudio
- las interpretaciones reflejan las limitaciones identificadas y el objetivo del estudio
- el informe del estudio es transparente y coherente

Si un estudio de ACV va a ser revisado críticamente, el alcance de la revisión crítica se debe establecer durante la fase de definición del objetivo y alcance del estudio. En dicho alcance se tendría que identificar por qué se está llevando a cabo la revisión crítica, qué se cubrirá y con qué nivel de detalle, y quién necesita participar en el proceso.

- Revisión interna: Una revisión crítica puede llevarse a cabo internamente. En tal caso, será realizada por un experto interno independiente del estudio del ACV.
- Revisión de expertos: Una revisión crítica puede llevarse a cabo externamente. En tal caso, será realizada por un experto externo, independiente del estudio del ACV.
- Revisión por las partes interesadas: Un experto externo e independiente es seleccionado por el comisionado original del estudio para que actúe como presidente de un panel de revisión. Basándose en el objetivo, el alcance y el presupuesto disponible para la revisión, el presidente selecciona a otros revisores independientes calificados.

Dentro del grupo de «*partes interesadas*» también se incluirían a las personas involucradas en el proyecto. El proceso de revisión puede llevarse a cabo de dos maneras diferentes:

- Revisión crítica durante el proceso: se realizaría en paralelo con el estudio de ACV, haciéndose las correcciones de forma continua.
- Revisión crítica al final del proceso: se trabajaría sobre el borrador final con la posibilidad de hacer correcciones antes de terminar el informe.

En algunos casos puede ser relevante publicar el informe de revisión crítica junto con el estudio del ACV (Astrup Jensen, y otros, 1997).

B.2 Análisis de inventario

El análisis de inventario es la segunda fase de un ciclo de vida en el que se incluyen los siguientes aspectos principales de acuerdo con la **Error! Reference source not found.:**

B.2.1 Recopilación de datos

El análisis de inventario incluye la recogida y tratamiento de datos para la elaboración de un perfil de consumo de materiales, residuos y emisiones para todas las fases del ciclo de vida, pero también para todo el ciclo de vida. Los datos pueden ser específicos de un lugar, *por ejemplo*, de empresas específicas, áreas determinadas y países concretos, pero también más genéricos (*por ejemplo, datos de fuentes más generales, organizaciones comerciales, encuestas públicas, etc.*). Los datos deben recopilarse de todos los procesos individuales del ciclo de vida. Estos datos pueden ser cuantitativos o cualitativos. Los datos cuantitativos son importantes en las comparaciones de procesos o materiales, pero a menudo no se dispone de ellos o la calidad es deficiente (demasiado antiguos o no representativos desde el punto de vista tecnológico, etc.). Los datos cualitativos más descriptivos pueden utilizarse para los aspectos medioambientales o para etapas individuales del ciclo de vida que no pueden cuantificarse, o si la definición del objetivo y del ámbito de aplicación permite una descripción no cuantitativa de las condiciones.

El análisis de inventario implica la recopilación de datos y procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas relevantes de un sistema de productos. Estas entradas y salidas pueden incluir el uso de recursos y liberaciones a la atmósfera, al agua y al suelo asociadas con el sistema. Se puede obtener una interpretación de estos datos, dependiendo de los objetivos y el alcance del ACV. Estos datos también constituyen la base de la evaluación del impacto del ciclo de vida.

Un inventario puede contener un gran número de emisiones de sustancias (>1.000), así como la entrada de recursos (>100). La relevancia ambiental puede diferir dramáticamente entre las diferentes emisiones y extracciones de recursos. Dado que el objetivo principal de un estudio de ACV es a menudo decidir cuál de los productos alternativos comparados es preferible desde una perspectiva ambiental o, en qué parte del ciclo de vida de un producto encontramos los mayores impactos ambientales, un inventario tan exhaustivo proporciona un soporte de decisión con un alcance limitado

(Hauschild & Huijbregts, Life Cycle Impact Assessment, 2015). El proceso de realizar un análisis de inventario es iterativo. A medida que se recolectan los datos y se aprende más sobre el sistema, se pueden identificar nuevos requisitos o limitaciones de los datos que requieren un cambio en los procedimientos de recolección de los mismos, de tal manera que los objetivos del estudio aún se sigan cumpliendo. A veces, se pueden identificar problemas que requieren revisiones del objetivo o alcance del estudio.

Los datos cualitativos y cuantitativos para su inclusión en el inventario se recogerán para cada uno de los procesos de las unidades que se incluyan dentro de los límites del sistema. Los procedimientos utilizados para la recopilación de datos pueden variar en función del alcance, el proceso unitario o la aplicación prevista del estudio. La recolección de datos puede ser un proceso que requiere muchos recursos. Las limitaciones prácticas de la recopilación de datos deben considerarse en el ámbito de aplicación y documentarse en el informe.

A continuación, se exponen algunas consideraciones importantes para la etapa de cálculo:

- Los procedimientos de asignación son necesarios cuando se trata de sistemas con distintos productos (*por ejemplo, múltiples productos procedentes del refinado del petróleo*). Los flujos de materiales y energía, así como las emisiones al medio ambiente asociadas, se asignarán a los distintos productos con arreglo a procedimientos claramente establecidos, que deberán estar documentados y justificados.
- El cálculo del flujo de energía debe tener en cuenta los diferentes *combustibles y fuentes de electricidad* utilizados, la eficiencia de la *conversión* y la *distribución del flujo de energía*, así como las *entradas y salidas* asociadas a la *generación y utilización* de dicho flujo de energía.

La recolección de datos es, a menudo, la parte más intensiva del trabajo de una evaluación del ciclo de vida, especialmente si se requieren datos específicos del sitio para todos los procesos individuales del ciclo de vida. En muchos casos se utilizan datos medios de la bibliografía (*investigaciones previas de los mismos o similares productos o materiales*) o datos de organizaciones comerciales. Varias organizaciones comerciales europeas han publicado o tienen previsto publicar datos «*de la cuna a la puerta*» que incluyen información sobre las entradas y salidas de materiales, desde la producción de productos semielaborados hasta los productos finales.

Los datos promedio pueden ser utilizados en el ACV conceptual o simplificado para obtener una primera impresión de las entradas y salidas potenciales de la producción de materiales específicos. Cuando se hace un ACV detallado, se deben preferir los datos

específicos del lugar. Los datos medios tienen a menudo algún año de antigüedad y, por lo tanto, no representan el último avance tecnológico.

El resultado de la recogida de datos puede presentarse en una tabla de inventario. Al realizar un ACV detallado, dichas tablas son invariablemente detalladas, intrincadas y complejas, mientras que las tablas de inventario requeridas en un ACV simplificado pueden ser más sencillas si se indica en la definición del objetivo y el alcance, es decir, si se centran en las emisiones seleccionadas, como por ejemplo el dióxido de carbono, los dióxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno.

La aplicabilidad de los conjuntos de datos para productos específicos, es decir, datos específicos de un emplazamiento en la evaluación del ciclo de vida, depende del formato de los datos. Con el fin de asegurar la aplicabilidad de los datos industriales, SPOLD inició un proyecto con un primer objetivo de desarrollar un formato estándar para los conjuntos de datos que se utilizarán en el ACV y con el segundo objetivo de garantizar la coherencia en el registro de los mismos en una base de datos, sin embargo, cesó su actividad en 2001 (Weidema B., 2013). La estructura del extenso formato de datos SPOLD constaba de cinco partes (Astrup Jensen, y otros, 1997; SPOLD, 1996):

- A. Identificación de datos; Fuentes y tratamiento de datos.
- B. Modelo de sistema (*Sub-sistemas; Reglas de corte; Coproductos y reglas de asignación; Modelos de energía; Modelos de transporte; Modelos de residuos; Otros supuestos; Otra información*).
- C. Estructura del sistema
- D. *Dato 1: Entradas (Entradas conocidas de la tecnosfera; entradas conocidas de la naturaleza)*
Dato 2: Salidas (Salidas conocidas a la tecnosfera; Salidas conocidas a la naturaleza).
Dato 3: Otros
Dato 4: Balance
- E. Lista de referencias

B.2.2 Refinamiento de los límites del sistema

Los límites del sistema se definen como parte del procedimiento de definición de alcance. Después de la recogida inicial de datos, los límites del sistema pueden refinarse, *por ejemplo*, como resultado de decisiones de etapas o subsistemas de exclusión de la vida útil, de la exclusión de flujos de materiales o de la inclusión de nuevos procesos unitarios que hayan demostrado ser significativos de acuerdo con el análisis de sensibilidad.

Reflejando la naturaleza iterativa del ACV, las decisiones sobre los datos a incluir se basarán en un análisis de sensibilidad para determinar su importancia, verificando así el análisis inicial.

El límite inicial del sistema de productos se revisará de acuerdo con los criterios de corte establecidos en la definición del ámbito de aplicación. El análisis de sensibilidad puede producir los siguientes resultados:

- la exclusión de etapas o subsistemas del ciclo de vida cuando el análisis de sensibilidad pueda demostrar una falta de importancia
- la exclusión de los flujos de material que carezcan de importancia para el resultado de los resultados del estudio
- la inclusión de nuevos procesos unitarios que han demostrado ser significativos en el análisis de sensibilidad

Es importante que se documente los resultados de este proceso de refinación y del análisis de sensibilidad. Este análisis sirve para limitar el manejo de datos subsiguiente a aquellos datos de entrada y salida que se determinan como significativos para el objetivo del estudio del ACV (Astrup Jensen, y otros, 1997).

B.2.3 Procedimientos de cálculo

No existen exigencias formales para el cálculo en el análisis del ciclo de vida, excepto las exigencias descritas para los procedimientos de asignación. Debido a la cantidad de datos es recomendable como mínimo desarrollar una hoja de cálculo para el propósito específico. Dentro de esta recomendación entraría una amplia variedad de software para el cálculo tanto general (*por ejemplo, hojas de cálculo de EXCEL, Lotus, etc.*), como específico, con programas desarrollados especialmente para la evaluación del ciclo de vida. Se puede elegir el programa apropiado dependiendo del tipo y la cantidad de datos a manejar (Astrup Jensen, y otros, 1997).

B.2.4 Validación de los datos

La validación de los datos debe llevarse a cabo durante el proceso de recogida de estos con el fin de mejorar la calidad general de los mismos. La validación sistemática de los datos puede indicar áreas en las que debe mejorarse la calidad de los mismos o en las que deben encontrarse datos en procesos similares o en procesos unitarios.

Durante el proceso de recolección de datos, se debe realizar una verificación permanente e iterativa de la validez de los mismos. La validación puede implicar el establecimiento, por ejemplo, de balances de masa, balances energéticos y/o análisis comparativos de los factores de

emisión. Las anomalías evidentes en los datos que surjan de dichos procedimientos de validación darán lugar a valores de datos (alternativos) que cumplan los requisitos de calidad de los datos establecidos.

Para cada categoría de datos y para cada lugar de notificación en el que se identifiquen ausencia de datos, el tratamiento de los que falten deberá dar lugar a:

- un valor aceptable de los datos notificados;
- un valor de datos «cero» si está justificado; o
- un valor calculado basado en los valores notificados de procesos unitarios que emplean tecnología similar.

Los datos de procesos similares o procesos unitarios a menudo tienen una calidad general inferior. Esto puede reflejarse en el índice de calidad para el conjunto de datos específico (Astrup Jensen, y otros, 1997).

B.2.5 Datos relacionados

Los datos fundamentales de entrada y salida son a menudo suministrados por la industria en unidades arbitrarias (por ejemplo, el consumo de energía como MJ/máquina/semana o las emisiones al sistema de alcantarillado como mg de metales/litro de aguas residuales). La maquinaria específica o el flujo de aguas residuales rara vez están conectados a la producción del producto en cuestión por sí mismos, sino que a menudo están relacionados con una serie de productos similares o tal vez con toda la actividad de producción.

Para cada proceso unitario, se determinará un flujo de referencia adecuado (por ejemplo, un kilogramo de material o un megajulio para la energía). Los datos cuantitativos de entrada y salida del proceso de la unidad se calcularán en relación con este flujo de referencia.

Los procesos unitarios se interconectan para permitir el cálculo del sistema completo, basándose en el diagrama de flujo detallado y en los límites del sistema. Esto se consigue normalizando las entradas y salidas de un proceso unitario en el sistema a la unidad funcional y, a continuación, normalizando todos los procesos unitarios ascendentes y descendentes de forma adecuada. El cálculo debe dar como resultado que todos los datos de entrada y salida del sistema se refieran a la unidad funcional. Se debe tener precaución a la hora de agregar las entradas y salidas en el sistema de productos, para verificar que se cumpla esto. El nivel de acumulación debe ser suficiente para satisfacer el objetivo del estudio.

Las categorías de datos solo deben incorporarse si están relacionadas con sustancias equivalentes y con impactos ambientales similares. Si se necesitan normas de adición

más detalladas, deben justificarse en la fase de definición del objetivo y el alcance del estudio o dejarse para una fase posterior de evaluación de impacto.

El flujo de referencia o unidad funcional se definirá para describir y cubrir la producción/funcionamiento real del producto considerado (*por ejemplo, el número de horas de funcionamiento semanal de la maquinaria real o la emisión real de aguas residuales del proceso*). Si esto no fuese así, no sería posible relacionar los datos con el producto real (Astrup Jensen, y otros, 1997).

B.2.6 Asignación y reciclaje

Cuando se realiza un análisis del ciclo de vida de un sistema complejo, puede que no sea posible manejar todos los impactos y resultados dentro de los límites del sistema. Este problema puede ser resuelto por medio de:

1. la ampliación de los límites del sistema para incluir todas las entradas y salidas, o mediante
2. la asignación de los impactos ambientales pertinentes al sistema estudiado

Si se evita la asignación, *por ejemplo*, ampliando los límites del sistema, se corre el riesgo de que el sistema sea demasiado complejo. La recopilación de datos, la evaluación del impacto y la interpretación pueden resultar demasiado costosas y poco realistas tanto en tiempo, como en dinero. La asignación puede ser una mejor alternativa, si se puede encontrar un método apropiado para resolver el problema real.

Dado que el inventario se basa intrínsecamente en los balances de materiales entre las entradas y las salidas, los procedimientos de asignación deben aproximar, en la medida de lo posible, las relaciones y características fundamentales entre dichas variables. Se deben tener en cuenta algunos principios a la hora de asignar cargas. Estos principios deben de ser lo suficientemente generales y exhaustivos para ser aplicables a los coproductos, a la asignación interna de energía, a los servicios (*por ejemplo, transporte, tratamiento de residuos*) y al reciclado, tanto en circuito abierto como en circuito cerrado:

- El sistema de productos considerado rara vez existe de forma aislada, generalmente incluye procesos unitarios que pueden compartirse con otros sistemas de productos. El estudio debe identificar estos procesos unitarios y tratarlos de acuerdo con los procedimientos que se presentan a continuación.
- Las entradas y salidas del sistema no asignadas serán iguales a la suma de las entradas y salidas correspondientes del sistema asignado. Deberá notificarse y explicarse cualquier desviación del balance de masa y energía.

- Cuando parezcan aplicables varios procedimientos de asignación alternativos, se llevará a cabo un análisis de sensibilidad para ilustrar las consecuencias de la desviación del enfoque seleccionado.

La asignación puede ser necesaria cuando se trata de:

- Procesos de «caja negra» de salida múltiple, es decir, cuando se produce más de un producto y algunos de esos flujos de productos están cruzando los límites del sistema.
- Procesos de múltiples entradas, como el tratamiento de residuos, en los que rara vez existe una causalidad cuantitativa estricta entre entradas y emisiones, etc.
- Reciclaje en circuito abierto, en el que un material de desecho que sale de los límites del sistema es utilizado como materia prima por otro sistema, fuera de los límites del sistema estudiado.

Sobre la base de los principios presentados anteriormente, se recomienda el siguiente orden descendente de los procedimientos de asignación:

1. Siempre que sea posible, debe evitarse o reducirse al mínimo la asignación. Esto se podría conseguir subdividiendo el proceso unitario en dos o más subprocesos, algunos de los cuales pueden ser excluidos del sistema estudiado. El transporte y la manipulación de materiales son ejemplos de procesos que a veces se pueden dividir de esta manera. En el caso de los sistemas que suministran más de un producto o función, o que implican flujos de reciclado, la asignación puede evitarse o reducirse mediante la inclusión de procesos unitarios adicionales, ampliando así los límites del sistema para que las entradas, salidas o reciclados permanezcan dentro del mismo.
2. Cuando no pueda evitarse la asignación, las entradas y salidas del sistema deben dividirse entre sus diferentes productos o funciones de manera que reflejen las relaciones físicas subyacentes entre ellos; es decir, deben reflejar la forma en que las entradas y salidas se modifican por cambios cuantitativos en los productos o funciones suministrados por el sistema. Estas «*relaciones causales*» entre flujos de entrada y salida del sistema pueden ser representadas por un modelo de proceso, que también puede mostrar la relación económica del sistema. La asignación resultante no será necesariamente proporcional a ninguna medida simple como los flujos de masa o moles de los coproductos.
3. Cuando no pueda establecerse o utilizarse la relación física como base para la asignación, las entradas deben asignarse entre los productos y

funciones de manera que reflejen las relaciones económicas entre ellos (*por ejemplo, las cargas podrían repartirse entre los coproductos en proporción al valor económico de los productos*).

Cualquier desviación de estos procedimientos siempre debe ser documentada y justificada. Algunos insumos pueden ser en parte coproductos y en parte residuos. En tal caso, es necesario determinar la relación entre unos y otros, ya que las cargas se asignarán únicamente al coproducto. Los procedimientos de asignación se aplicarán de manera uniforme a las entradas y salidas similares de los sistemas considerados. *Por ejemplo, si se asignan productos utilizables, como productos intermedios o descartados, que salen de los sistemas, el procedimiento de adjudicación deberá ser similar al método de asignación utilizado para los productos que entran en los sistemas. El procedimiento de asignación puede variar el factor de asignación de 0% a 100%.*

Lindfors et al. sugieren que las asignaciones deben basarse en el siguiente principio guía en orden descendente:

- causalidad natural o una aproximación adecuada
- causalidad económica/social (*por ejemplo, ganancia esperada o valor bruto de las ventas*)
- parámetros físicos como parámetros de asignación (*por ejemplo, masa de salidas, contenido energético de la salida, contenido exergético de la salida, área de salida, volumen de salida, contenido molar de la salida o números arbitrarios: 100/0% o 50/50%*)

El método de asignación del 50/50% se recomienda para el ACV simplificado, ya que garantiza que no se pierda información sobre «*cuestiones clave*». Este método puede utilizarse en la asignación de cargas ambientales causadas por la producción primaria, la gestión de residuos y los procesos de reciclado.

El reciclaje de productos implica que las entradas y salidas ambientales asociadas con la fabricación de un producto y su reciclaje deben ser compartidas por más de un sistema de productos. Cualquier sistema en el que se produzca el reciclaje, puede describirse normalmente como uno de los tres modelos diferentes:

- A. Si se dispone de información suficiente sobre la proporción de producto reciclado que se utiliza en otro sistema de productos (el coeficiente de exportación), puede optarse por un enfoque de reciclado de ciclo abierto. El reciclaje en circuito abierto es en realidad un caso especial de asignación.
- B. Si se dispone de información suficiente sobre la proporción de producto reciclado que se utiliza en el mismo sistema de productos, puede optarse

por un enfoque de reciclado de ciclo cerrado. El producto reciclado reemplaza una cantidad del producto virgen.

- C. Si se dispone de información suficiente sobre el número de veces que se recicla el mismo material (ya sea dentro del mismo sistema de productos o no), las entradas y salidas medioambientales «*vírgenes*» de cada ciclo de producto podrán dividirse por el número de ciclos a los que se someterá dicho material. El resultado se sumará a las demás entradas y salidas medioambientales de cada ciclo de producto individual («*reciclado en cascada*»). Este modelo comprendería una secuencia de modelos A y/o B.

Las reclamaciones relativas al reciclado deberán documentarse y justificarse y basarse en la práctica real y no en las posibilidades teóricas. El detalle y la complejidad de los procedimientos de asignación que deben utilizarse dependen del nivel de sofisticación de la evaluación del ciclo de vida real (Astrup Jensen, y otros, 1997).

B.3 Evaluación de impacto

La evaluación de impacto es la tercera fase de una evaluación del ciclo de vida que contiene las siguientes cuestiones principales de acuerdo con la **Error! Reference source not found.**:

B.3.1 Definición de la categoría

La evaluación del impacto del ciclo de vida incluye como primer elemento la definición de las categorías de impacto que deben considerarse (ISO, 14040, 2006).

Este es un seguimiento de las decisiones tomadas en la fase de objetivo y alcance. Basándose en el tipo de información recopilada en la fase de inventario, se pueden redefinir los límites definidos en dicha fase primera de objetivo y alcance.

Se han propuesto numerosas categorías ambientales para la evaluación del impacto del ciclo de vida. La mayoría de los estudios se basarán en estas categorías y no definirán las sus propias. La selección de las categorías debe ser coherente con el objetivo y el alcance del estudio. Esta selección no debe utilizarse para evitar o disfrazar cuestiones o preocupaciones medioambientales. La exhaustividad y el alcance de la encuesta de categorías dependen de los objetivos y el alcance.

Las categorías de impacto se seleccionan para describir los impactos causados por los productos o sistemas de productos considerados. Hay que considerar una serie de preguntas al seleccionar las categorías de impacto (Lindfors, y otros, Nord 1995:20: Nordic guidelines on life-cycle assessment, 1995; Astrup Jensen, y otros, 1997):

- *Integridad*: todos los problemas ambientales de relevancia deben ser cubiertos por la lista.

- *Utilidad*: la lista no debe contener demasiadas categorías.
- *Independencia*: debe evitarse la doble contabilidad mediante la elección de categorías de impacto mutuamente independientes.
- *Relación con la etapa de caracterización*: las categorías de impacto elegidas deben estar relacionadas con los métodos de caracterización disponibles.

Las categorías de impacto más comúnmente empleadas son las siguientes:

Tabla 44. Categorías de impacto más utilizadas

Recursos abióticos
Recursos bióticos
Uso de la tierra
Calentamiento global
Agotamiento de la capa de ozono estratosférico
Impactos ecotoxicológicos
Impactos toxicológicos en humanos
Formación fotoquímica de oxidantes
Acidificación
Eutrofización
Entorno de trabajo

Las categorías de impacto se describen en detalle en el ANEXO D: Categorías de impacto.

B.3.2 Clasificación

La evaluación del impacto del ciclo de vida incluye como segundo elemento la clasificación de los datos de entrada y salida del inventario (ISO, 14040, 2006).

El elemento de clasificación tiene por objeto asignar datos de entrada y salida de inventario a las categorías. La asignación de datos de inventario es el nivel más simple o mínimo de evaluación del impacto del ciclo de vida. Esto se puede utilizar para identificar y marcar los problemas asociados con los datos de entrada y salida de inventario. En esta etapa, hay una suposición implícita de que «*menos es mejor*» y se excluyen varias consideraciones importantes, como las diferencias de potencia o la persistencia ambiental.

La clasificación es un paso cualitativo basado en el análisis científico de los procesos ambientales relevantes. La clasificación debe asignar los datos de entrada y salida del inventario a los impactos ambientales potenciales, es decir, a las categorías de impacto. Algunos productos contribuyen a diferentes categorías de impacto y, por lo tanto, deben

mencionarse dos veces. El doble recuento resultante es aceptable si los efectos son independientes entre sí, mientras que no se permite el doble recuento de efectos diferentes en la misma cadena de efectos (*por ejemplo, agotamiento de la capa de ozono estratosférica y efectos toxicológicos humanos en el cáncer de piel*).

Las categorías de impacto pueden situarse en una escala que las divide en tres grupos espaciales diferentes:

Tabla 45. Categorías de impacto más utilizadas

Impactos globales
Impactos regionales
Impactos locales

A veces puede incluirse un cuarto grupo correspondiente a impactos continentales. La agrupación no es inequívoca para todas las categorías de impacto ejemplificadas (*por ejemplo, la toxicidad ambiental puede ser global, continental, regional y local*). Las categorías de impacto a menudo están directamente relacionadas con la exposición, es decir, la exposición global conduce a impactos globales, la exposición continental conduce a impactos continentales. Algunas de las categorías de impacto están fuertemente correlacionadas con las condiciones continentales, regionales o locales, es decir, algunas localidades están más predispuestas a ciertos impactos que otras (*algunos lagos de Escandinavia pueden mencionarse como ejemplos de localidades que están más predispuestas a la acidificación que los lagos de otras partes de Europa*). El aspecto temporal también es importante cuando se consideran ciertas categorías de impacto, por ejemplo, el calentamiento global y el agotamiento del ozono estratosférico con horizontes temporales de 20 a 500 años.

Hasta la fecha, no se ha llegado a un consenso sobre una sola lista por defecto de categorías de impacto, lo más parecido a lista preseleccionadas serían las metodologías de impacto, las cuales analizan una serie de categorías concretas (Udo de Haes, Part I: Discussion of general principles and guidelines for practical use, 1996; SETAC-Europe, 1992; Astrup Jensen, y otros, 1997).

B.3.3 Caracterización

La evaluación del impacto del ciclo de vida incluye, como tercer elemento, la caracterización de los datos del inventario (ISO, 14040, 2006).

La caracterización de la caracterización consiste en modelar categorías en términos de indicadores y, de ser posible, proporcionar una base para la adición de los insumos y productos del inventario dentro de la categoría. Esto también se hace en términos del indicador para representar un cambio global o una carga para esa categoría. El resultado

de la caracterización es que la combinación de indicadores de categoría representa la carga inicial y el perfil de agotamiento de recursos.

Cada categoría debe tener un modelo específico para la relación entre los datos de entrada y salida, y el indicador. El modelo debería basarse en el conocimiento científico, siempre que sea posible, pero puede tener supuestos simplificadores y opciones de valor. La representatividad y precisión de cada modelo depende de varios factores, como la compatibilidad espacial y temporal de la categoría, con el inventario. La relación entre los datos de entrada y salida del inventario y el indicador de categoría es normalmente fuerte (o al alcance). La relación entre el indicador y el criterio, o criterios, de valoración suele ser más débil y puede ser principalmente cualitativa.

Las categorías de impacto se describen en detalle en el ANEXO D: Categorías de impacto. La caracterización es principalmente un paso cuantitativo basado en el análisis científico de los procesos ambientales relevantes. La caracterización tiene que asignar la contribución relativa de cada entrada y salida a las categorías de impacto seleccionadas. Debe estimarse la contribución potencial de cada entrada y salida a los impactos ambientales. Para algunas de las categorías de impacto ambiental existe consenso sobre los factores de equivalencia que deben utilizarse en la estimación del impacto total (por ejemplo, potencial de calentamiento global, potencial de agotamiento de la capa de ozono, etc.), mientras que los factores de equivalencia para otros impactos ambientales no están disponibles a nivel de consenso (por ejemplo, recursos bióticos, uso de la tierra, etc.) (Astrup Jensen, y otros, 1997).

B.3.4 Valoración/Ponderación

El elemento anterior, la caracterización, da lugar a una declaración cuantitativa sobre diferentes categorías de impacto (por ejemplo, el calentamiento global, el agotamiento del ozono estratosférico y los efectos ecotoxicológicos). La comparación directa de estas categorías no es posible. Por lo tanto, la evaluación del impacto del ciclo de vida incluye como cuarto elemento una valoración/ponderación de las categorías de impacto entre sí (ISO, 14040, 2006).

La ponderación tiene por objeto clasificar, ponderar o, en su caso, agrupar los resultados de las diferentes categorías de evaluación del impacto del ciclo de vida para llegar a la importancia relativa de estos resultados diferentes.

El proceso de ponderación no es técnico, científico ni objetivo, ya que estos resultados de la evaluación del impacto del ciclo de vida (*por ejemplo, los indicadores de gases de efecto invernadero o de agotamiento de los recursos*) no son directamente comparables.

No obstante, la ponderación puede realizarse mediante la aplicación de técnicas analíticas con base científica. La ponderación es interesante para abordar tres aspectos básicos:

- expresar la preferencia relativa de una organización o grupo de partes interesadas basada en políticas, objetivos u objetivos, y opiniones o creencias personales o de grupo comunes al grupo;
- para asegurar que el proceso sea visible, documentable y notificable, y
- para establecer la importancia relativa de los resultados se basa en el estado de los conocimientos sobre estos temas.

La ponderación es un paso cualitativo o cuantitativo que no se basa necesariamente en las ciencias naturales, sino a menudo en valores políticos o éticos. La ponderación se ha denominado anteriormente como valoración. Los métodos de ponderación han sido desarrollados por diferentes instituciones sobre la base de diferentes principios (Astrup Jensen, y otros, 1997; Lindeijer, 1996):

- Enfoque sustitutivo
- Enfoque de reducción tecnológico
- Monetización
- Objetivos o estándares establecidos («*Distancia al objetivo*»)
- Paneles de expertos («*Enfoque social*»)

B.3.4.1 Enfoque sustitutivo

En este enfoque, una o varias medidas cuantitativas se consideran indicativas del impacto medioambiental total (por ejemplo, el consumo de energía, el desplazamiento de materiales y el consumo de espacio) (Astrup Jensen, y otros, 1997).

B.3.4.2 Enfoque de reducción tecnológico

La posibilidad de disminuir las cargas ambientales mediante el uso de diferentes métodos tecnológicos de reducción puede utilizarse para establecer un valor de la carga ambiental específica. Este enfoque puede aplicarse tanto a los datos de inventario como a las puntuaciones de impacto (Astrup Jensen, y otros, 1997).

B.3.4.3 Monetización

Este enfoque puede describirse con las siguientes premisas:

- Utilitarismo (los valores se miden sumando las prioridades humanas).
- Voluntad de pagar/aceptar es una medida adecuada de las prioridades.
- Los valores de calidad ambiental pueden ser sustituidos por otros productos básicos

Este enfoque puede aplicarse tanto a los datos de inventario como a las puntuaciones de impacto (Astrup Jensen, y otros, 1997).

B.3.4.4 Objetivos o estándares establecidos

Las normas medioambientales y los objetivos de calidad, así como los objetivos políticos de reducción, pueden utilizarse para calcular los volúmenes críticos de las emisiones atmosféricas, al agua, al suelo o en el entorno laboral. Los objetivos o normas pueden ser formulados por las autoridades nacionales o locales, dentro de una misma empresa, etc. (Astrup Jensen, y otros, 1997).

B.3.4.5 Paneles de expertos

Los paneles de expertos pueden estar formados por personas desconocedoras del tema, grupos sociales, expertos científicos, gobiernos u organismos internacionales. La credibilidad de un panel, según Volkwein et al. (Volkwein, Klöppfer, & Gühr, 1996), puede mejorarse teniendo en cuenta los siguientes aspectos (Astrup Jensen, y otros, 1997):

1. Expertos en ACV de diferentes grupos sociales como panelistas.
2. Revisión por pares con los criterios de valoración, normas para su aplicación y una técnica de clasificación transparente.
3. Documentación de los argumentos que condujeron a la valoración final.

A modo de resumen, la evaluación de ciclo de vida tiene el propósito de traducir los flujos elementales del inventario del ciclo de vida en sus contribuciones potenciales a los impactos ambientales que se consideran en el ACV y así apoyar la fase de interpretación en la que se contestan las preguntas planteadas en la definición del objetivo (Hauschild & Huijbregts, Life Cycle Impact Assessment, 2015).

De acuerdo con la norma ISO 14040, la EICV consta de cinco etapas, como se ilustra en la Figura 58 (Hauschild & Huijbregts, Life Cycle Impact Assessment, 2015).

- *Selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización (selección)*: En este punto es donde se seleccionan los impactos a tratar de acuerdo con el objetivo del estudio y el método elegido para cada categoría de impacto.
- *Asignación de los resultados del ICV a las categorías de impacto seleccionadas (clasificación)*: Los flujos elementales del inventario, como el consumo de recursos y las emisiones a la atmósfera o al agua, se asignan a las categorías de impacto pertinentes entre las seleccionadas en la etapa 1, en función de su capacidad para contribuir a diferentes problemas ambientales.

- *Cálculo de los resultados de los indicadores de categoría (caracterización):* Para cada flujo elemental asignado a una categoría de impacto, la cantidad se multiplica por el llamado factor de caracterización. El factor de caracterización de un flujo elemental da una representación cuantitativa de su importancia para una categoría de impacto específica. La puntuación del indicador resultante se expresa en una métrica común a todas las contribuciones dentro de la categoría de impacto. Por ejemplo, en términos de kg equivalentes de CO₂ para la contribución de una emisión de metano procedente de la producción de 1 kg de arroz al calentamiento global. Las puntuaciones del indicador para todos los flujos elementales que contribuyen a una categoría de impacto específica se suman para llegar a una puntuación de impacto total para esa categoría (Hauschild & Huijbregts, Life Cycle Impact Assessment, 2015).

Flujos elementales del Inventario del Ciclo de Vida

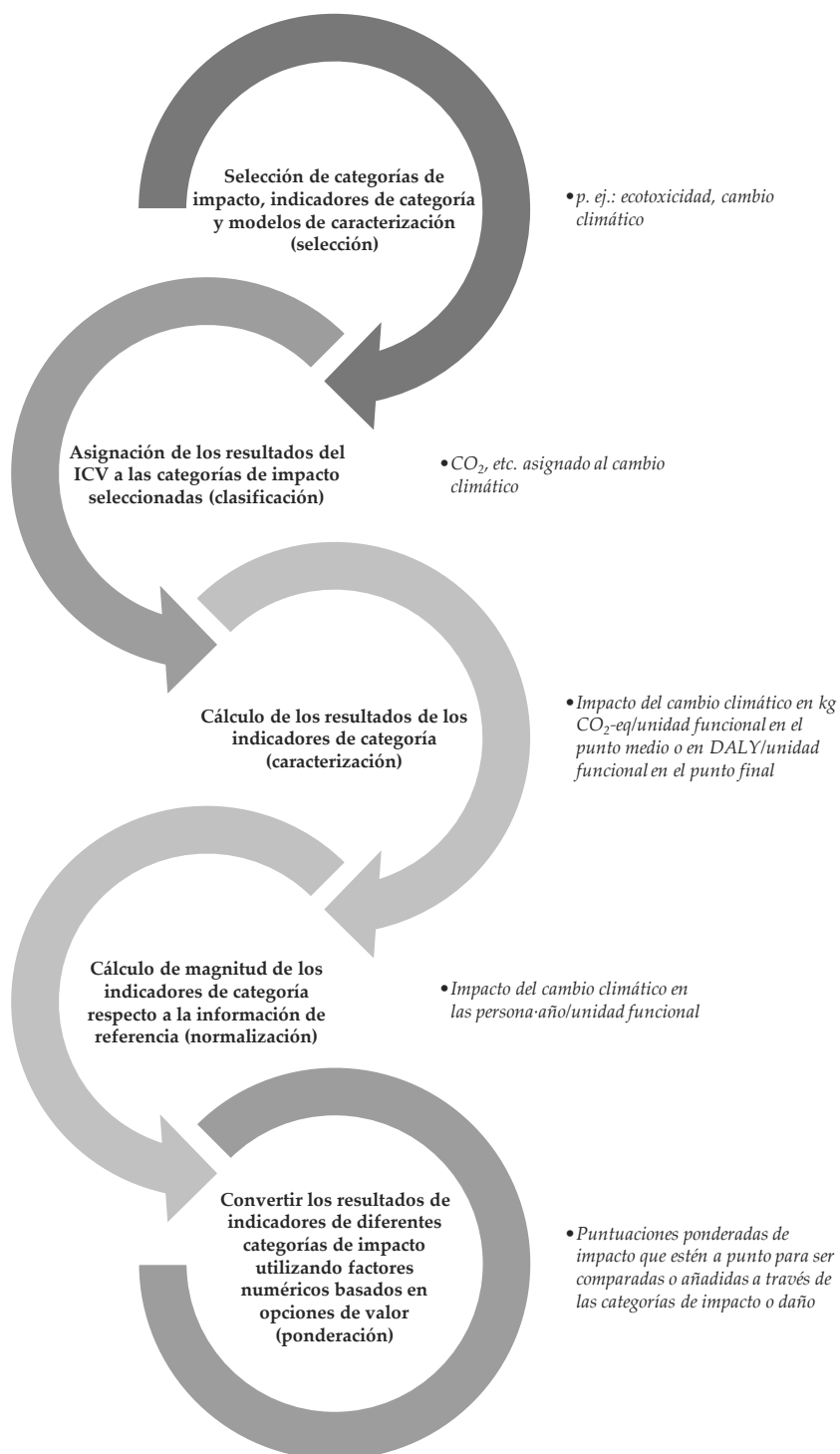


Figura 58. Las cinco etapas de la evaluación del impacto del ciclo de vida.

Mientras que los primeros tres pasos de la EICV son obligatorios para que un ACV cumpla con los requisitos de la norma *ISO 14044* (ISO, 14044, 2006), los dos pasos siguientes son opcionales:

- *Cálculo de la magnitud de los resultados de los indicadores de categoría en relación con la información de referencia (normalización)*: Las puntuaciones de los indicadores resultantes de la etapa de caracterización se presentan en métricas que difieren entre las categorías de impacto. Para tener una primera impresión de sus magnitudes relativas, pueden expresarse a partir de un conjunto común de información de referencia disponible para todas las categorías de impacto. Una opción frecuente de información de referencia es el impacto anual de una persona promedio para cada una de las categorías de impacto. Por lo tanto, la normalización aporta puntuaciones para las diferentes categorías de impacto a una escala común, en el caso dado, expresándolas en equivalentes de persona o persona-año, lo que puede apoyar la comprobación de resultados incoherentes y ayudar a la comunicación de los resultados. Además, la normalización puede utilizarse como preparación para una ponderación de los resultados del indicador.
- *Convertir los resultados de indicadores de diferentes categorías de impacto utilizando factores numéricos basados en opciones de valor (ponderación)*: Para apoyar una comparación final de los resultados del indicador entre las categorías de impacto, se puede realizar una ponderación, aplicando factores de ponderación que se basan en opciones de valor y representan la importancia asignada a cada una de las categorías de impacto. Puede ser necesaria una ponderación para concluir los estudios en los que existen compensaciones entre los resultados de las diferentes categorías de impacto, como la comparación entre los combustibles fósiles con una contribución principal al calentamiento global y los biocombustibles con una contribución principal al uso de la tierra y a los impactos del uso del agua (Herrmann, Jørgensen, Bruun, & Hauschild, 2013). Después de la ponderación, los resultados pueden ser sumados a través de las categorías de impacto a una sola puntuación para facilitar la interpretación (Hauschild & Huijbregts, Life Cycle Impact Assessment, 2015).

B.4 Interpretación de los resultados

La interpretación es la cuarta fase de la evaluación del ciclo de vida que contiene las siguientes cuestiones principales de acuerdo con la **Error! Reference source not found.**

B.4.1 Identificación de los problemas medioambientales significativos

El primer paso en la identificación es la selección de los resultados clave de una manera prudente y justificable.

El objetivo de este paso es estructurar la información del análisis de inventario y, si se realiza adicionalmente, de la fase de evaluación del impacto del ciclo de vida, con el fin de determinar las cuestiones ambientales significativas de acuerdo con la definición del objetivo y alcance.

Las cuestiones ambientales son insumos y productos, es decir, los resultados de la fase de inventario y los indicadores ambientales, es decir, los resultados de la fase de evaluación del impacto del ciclo de vida si se lleva a cabo la EICV. Las cuestiones ambientales significativas representan los resultados más importantes del estudio de acuerdo con la definición del objetivo y el alcance.

La etapa de identificación incluye la estructuración y presentación de la información relevante:

- resultados de las diferentes fases, es decir, presentación de, *por ejemplo*, datos del análisis de inventario en cuadros, figuras o diagramas, etc., o presentación de los resultados de la evaluación de impacto
- opciones metodológicas
- métodos de valoración utilizados
- función y responsabilidad de las distintas partes interesadas

Dependiendo de la complejidad del estudio del ACV, las cuestiones ambientales significativas del sistema considerado pueden ser, por ejemplo, el CO₂, el NO_x y el SO₂, o pueden ser, por ejemplo, el calentamiento global, el agotamiento del ozono estratosférico, los impactos ecotoxicológicos y toxicológicos humanos, etc. (Astrup Jensen, y otros, 1997).

B.4.2 Evaluación

El segundo paso, que consta de tres elementos, consiste, en primer lugar, en llevar a cabo una comprobación cualitativa de la selección de los datos, los procesos, etc., *por ejemplo*, para debatir las posibles consecuencias de la omisión de información; en segundo lugar, aplicar un análisis cualitativo o cuantitativo sistemático de cualquier implicación de los cambios en los datos de entrada (directamente como incertidumbre de los datos e indirectamente causada por incertidumbres metodológicas o epistemológicas); y, en tercer lugar, para debatir las variaciones identificadas en el marco del objetivo y el ámbito de aplicación, *por ejemplo*, los objetivos de calidad de los datos del estudio.

El objetivo de este paso es establecer una relación de confianza con respecto al resultado del estudio, basada en las fases anteriores del ACV, y en los aspectos ambientales significativos identificados en el primer paso de la interpretación.

Los resultados deben presentarse de tal forma que proporcionen al encargado o a cualquier parte interesada una visión clara y comprensible de los resultados del estudio.

La evaluación se llevará a cabo de acuerdo con el objetivo y alcance, y deberá tener en cuenta el uso final del estudio. La interpretación que se haga en esta fase se verá reforzada por los hechos y cálculos presentados en al menos los tres elementos siguientes:

1. control de integridad
2. control de sensibilidad
3. control de consistencia

y complementado por los resultados de la investigación:

- análisis de incertidumbre, y
- evaluación de la calidad de los datos

La metodología para los elementos mencionados anteriormente en el paso de evaluación solo se desarrolla en un grado limitado. A continuación, se describen brevemente las comprobaciones de integridad, sensibilidad y consistencia (Astrup Jensen, y otros, 1997).

B.4.2.1 Comprobación de integridad

La comprobación de integridad es un procedimiento cualitativo.

El objetivo de este primer elemento de la etapa de evaluación es asegurar que los temas ambientales significativos previamente identificados representen adecuadamente la información de las diferentes fases del ACV (análisis de inventario, evaluación de impacto) de acuerdo con el objetivo y alcance definidos.

El procedimiento se centra en la información recogida en la fase de inventario. En muchos estudios de ACV habrá algunos conjuntos de datos que no están disponibles o incompletos, es decir, habrá una nueva recopilación de datos a menos que se utilicen los recursos necesarios para mejorar el conjunto de los mismos. La verificación de integridad debe decidir si es necesario completar el conjunto de datos. Si el conjunto de estos es importante de acuerdo con los temas ambientales definidos, se puede mejorar la

recolección de los mismos o revisar la definición del objetivo y alcance (Astrup Jensen, y otros, 1997).

B.4.2.2 Comprobación de la sensibilidad

La comprobación de la sensibilidad implica un procedimiento sistemático para estimar los efectos de las variaciones de los parámetros en el resultado del estudio con el objetivo de establecer un grado requerido de confianza en los resultados del estudio en relación con su objetivo general. El objetivo de este paso es:

- revisar los resultados de los análisis de sensibilidad y de incertidumbre que se realizaron en las diferentes fases (análisis de inventario, evaluación de impacto), y
- evaluar si los problemas ambientales significativos, previamente identificados como los más importantes, exceden las variaciones aceptables establecidas en el objetivo y alcance del estudio.

Al realizar un análisis de sensibilidad, se comprueba la estabilidad de esos parámetros. El análisis de sensibilidad se puede realizar mediante una especie de escenario de «*qué pasaría si*» («*what if*»), en el que el valor de los diferentes parámetros de entrada cambia sistemáticamente. Una forma más adecuada de realizar un análisis de sensibilidad es modificar sistemáticamente los parámetros de entrada mediante simulaciones (*por ejemplo, las simulaciones de Monte Carlo*) (Astrup Jensen, y otros, 1997).

B.4.2.3 Verificación de consistencia

La verificación de consistencia es también un procedimiento cualitativo. El objetivo de este elemento de la etapa de evaluación es llevar a cabo una comprobación exhaustiva de la coherencia de los métodos, procedimientos y tratamiento de los datos utilizados a lo largo del estudio.

El procedimiento tiene que comprobar si los métodos, etc., se han utilizado de forma coherente y especialmente en estudios comparativos. Los siguientes puntos son temas para la verificación de consistencia:

- diferencias regionales y/o temporales
- límites del sistema
- métodos de asignación
- diferenciación entre procesos en primer plano y en segundo plano
- métodos de valoración/ponderación

La comprobación de la integridad, la sensibilidad y la coherencia puede complementarse con los resultados del análisis de la incertidumbre y la evaluación de la calidad de los datos. Ambos se realizan a lo largo del estudio ya que están estrechamente

relacionados con los datos y cálculos individuales. Las conclusiones del análisis de incertidumbre y de la evaluación de la calidad de los datos son importantes en el proceso de interpretación de los datos y de los resultados de los cálculos (Astrup Jensen, y otros, 1997).

B.4.3 Conclusiones y recomendaciones

El paso final de la interpretación es más o menos similar a la tradicional conclusión y recomendación de parte de una evaluación científica y técnica, investigación o similar.

El objetivo de este tercer paso de la interpretación es llegar a las conclusiones y recomendaciones para el informe del estudio del ACV o estudio de inventario del ciclo de vida.

Este paso es importante para mejorar la información y la transparencia del estudio. Ambos son esenciales para los lectores del informe del ACV. Los resultados de la revisión crítica del estudio también se incluirán al presentar las conclusiones y recomendaciones (Astrup Jensen, y otros, 1997).

ANEXO C

Bases de datos

BASES DE DATOS

En la actualidad, los sistemas informáticos dedicados a realizar Análisis de Ciclo de Vida, trabajan con diversas bases de datos de las que extraen la información necesaria para completar la fase del Inventario de Ciclo de Vida.

Dependiendo de la finalidad del estudio, y de los requisitos de calidad de los datos que se van a utilizar, es posible utilizar una única base de datos, o combinar varias. La mayoría de los programas que incorporan bases de datos preinstaladas, permiten incorporar nuevas, modificar las existentes para adaptarlas a las necesidades específicas de cada usuario, o, incluso, crearlas a partir de cero. A continuación, se especifican las bases de datos más conocidas y con las que más comúnmente se suele trabajar.

C.1 BUWAL 250

La base de datos Buwal 250 fue desarrollada en el Instituto Suizo de Embalaje y se nutre de los datos de ETH-ESU. Dentro de sus mediciones incluye datos relativos a emisiones debidas a la producción energética, así como a procesos de producción de materiales, transporte y residuos. Es una de las bases de datos más utilizadas, incluye un total de 248 tipos de procesos en su versión del año 97 (Schweizerisches Verpackungsinstitut SVI, s.f.).

C.2 Data archive

Desarrollada por PRé Consultants, recopila información de múltiples fuentes como Chalmers, BUWAL 132, PWMI, Van den Bergh en Jurgen, entre otras. Presenta el inconveniente de que sus datos son antiguos y desfasados, por lo que se uso se debería limitar a casos en los que no se dispusiera de otro tipo de datos más recientes. Contiene un total de 383 tipos de procesos pertenecientes al periodo comprendido entre 1988 y 1995 (PRé Consultants (Product Ecology consultants), s.f.).

C.3 Ecoinvent

La base de datos de Ecoinvent v3 contiene datos de LCI de varios sectores como la producción de energía, el transporte, los materiales de construcción, la producción de productos químicos, la producción de metales y las frutas y verduras. La base de datos completa consta de más de 10.000 conjuntos de datos interconectados, cada uno de los cuales describe un inventario del ciclo de vida a nivel de proceso. Los tres modelos de sistemas Ecoinvent son *“Allocation, recycled content”*, *“Allocation, default”* y *“Consequential”*.

El modelo de sistema *“Allocation, recycled content”*, o *“Cut-off”* se basa en el enfoque de que la producción primaria de materiales siempre se asigna al usuario primario de un material. Si se recicla un material, el productor primario no recibe ningún crédito por el

suministro de materiales reciclables. La consecuencia es que los materiales reciclables están disponibles libres de cargas para los procesos de reciclaje y los materiales secundarios (reciclados) solo soportan los impactos de los procesos de reciclaje. Además, los productores de residuos no reciben ningún crédito por el reciclaje o la reutilización de productos resultantes de cualquier tratamiento de residuos. Este enfoque también se ha utilizado en las versiones de Ecoinvent 1 y 2.

Ecoinvent cambió el nombre del modelo de sistema “*Allocation, default*” a “*Allocation, at the point of substitution (APOS)*” con el lanzamiento de la versión 3.2 de la base de datos. El modelo de sistema “*Allocation, default*” contiene dos opciones metodológicas:

1. utiliza el promedio de suministro de productos, tal como se describe en los conjuntos de datos de actividad de mercado (*market*), y
2. utiliza la división (*allocation*) para convertir los conjuntos de datos de varios productos en conjuntos de datos de un solo producto. Los flujos se asignan en función de su “*valor real*”, que es el ingreso económico corregido por algunas imperfecciones y fluctuaciones del mercado. El modelo de sistema “*Allocation, default*” utiliza el mismo enfoque atribucional que la base de datos de Ecoinvent en su versión 2.

La posibilidad de utilizar la asignación “*Consequential*” ofrece a los profesionales una alternativa al enfoque de atribución. Tanto la base de datos atribucional (*default*) como “*Consequential*” están disponibles en diferentes software para ser usada con procesos unitarios y de sistema.

- Los **procesos unitarios** (*Unit processes*) contienen enlaces a otros procesos de unidades, a partir de los cuales los flujos de inventario pueden ser calculados. Los procesos unitarios pueden utilizarse para la interpretación detallada y el análisis de incertidumbre utilizando Monte Carlo (a excepción de la biblioteca de unidades “*Consequential*”). Debido a su estructura en bucle, el análisis de los procesos unitarios puede suponer un mayor tiempo de cálculo, dependiendo de la potencia del ordenador utilizado.
- Los **procesos del sistema** (*System processes*) contienen los flujos de inventario ya calculados y no contienen enlaces a otros procesos. Si se emplean elementos la base de datos de Ecoinvent como procesos en segundo plano, se recomienda elegir procesos de sistema para aumentar la velocidad de cálculo.

Tanto los procesos unitarios como los del sistema dan el mismo resultado, aunque en ocasiones hay una pequeña diferencia debido a errores de redondeo. Es posible

cambiar entre las bibliotecas de la unidad y del sistema al definir una configuración de cálculo (ecoinvent, s.f.; PRé Consultants (Product Ecology consultants), s.f.).

C.4 ETH-ESU

Fue desarrollada por el Instituto de Investigación, homónimo, ETH-ESU de Zúrich, en Suiza. La base de datos incorpora una amplia variedad de procesos como son la producción e importación de combustibles, la producción y comercialización de electricidad, emisiones procedentes de la extracción de la energía primaria, el refinado, la extracción de recursos minerales, la producción de materias primas y materiales generales, entre otras. La limitación geográfica de esta base de datos es, principalmente, para países del Oeste europeo, con un total de 440 tipos de procesos, y cuya versión más compacta data de 1996. La versión completa de ese mismo año, llega a alcanzar los 1100 procesos (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, s.f.).

C.5 Franklin

Esta base de datos está basada en los datos recopilados en los Estados Unidos sobre materiales generales, transporte y energía. Engloba un total de 78 tipos de procesos en la versión de 1996 (Eastern Research Group, Inc., s.f.).

C.6 Idemat

Se desarrolló en el Delft University of Technology de Holanda como compilación de distintas fuentes de datos. En su versión de 2001 recopila un total de 508 tipos de procesos enfocados en la producción de materiales (Faculteit Industrieel Ontwerpen, s.f.).

C.7 Industry data

Se basa en los datos recogidos de publicaciones procedentes de distintas asociaciones de industrias internacionales. Los datos, en su mayor parte, siguen una filosofía *“de la cuna hasta la puerta”* y, en 2001, contaba con un total de 74 procesos (PlasticsEurope, s.f.).

C.8 IVAM

Esta base de datos se orienta principalmente a los procesos involucrados en la construcción. En el año 2000, la base de datos contaba con más 80 tipos de procesos, los cuales aumentaron hasta alcanzar en las últimas versiones (versión 4) los 1350 procesos y más de 350 materiales (IVAM, s.f.).

ANEXO D

Categorías de impacto

CATEGORÍAS DE IMPACTO

Las diferentes categorías de impacto mencionadas en la ISO (ISO, 14040, 2006), complementadas con otras categorías pertinentes (*por ejemplo, entorno de trabajo*), se describirán brevemente a continuación:

- recursos abióticos
- recursos bióticos
- uso del suelo
- calentamiento de la Tierra
- ozono estratosférico
- agotamiento impactos ecotoxicológicos
- impactos toxicológicos humanos
- formación fotoquímica de oxidantes
- acidificación
- eutrofización
- entorno de trabajo

Cabe destacar que no se ha llegado a un consenso internacional para el tratamiento de todas las categorías de impacto, y que la descripción de los diferentes enfoques no puede considerarse completa, sino como ejemplos seleccionados. Siempre que sea posible, se hará referencia a descripciones más detalladas de las categorías de impacto y de los usos prácticos de las diferentes categorías (Astrup Jensen, y otros, 1997).

D.1 Recursos abióticos

Los recursos abióticos cubren tres subcategorías (Finnveden, Part III: "Resources" and related impact categories, 1996):

- yacimientos (*por ejemplo, de combustibles fósiles, minerales, acuíferos, sedimentos, arcilla, turba, grava, etc.*)
- fondos (*por ejemplo, agua subterránea, agua de lago, suelo*)
- recursos de los flujos naturales (*como el aire, el agua, la radiación solar y las corrientes oceánicas*)

Los yacimientos, como los minerales, se consideran recursos limitados porque no son renovables dentro de un horizonte temporal pertinente. Según la Oficina de Minas de los Estados Unidos, los yacimientos minerales se pueden dividir en yacimientos conocidos y en yacimientos que aún no se han encontrado. Los depósitos conocidos se pueden dividir en depósitos aprobados y supuestos y los depósitos aún no encontrados se pueden dividir en depósitos hipotéticos y especulativos. Los depósitos conocidos

constituyen una reserva que es rentable de extraer y una base de reservas que es marginal, rentable o subeconómica de extraer (Møller & Schmidt, 1994). Para una serie de minerales, metales y combustibles fósiles, la relación "reserva a uso" puede utilizarse en la evaluación de la categoría de impacto real (Lindfors, y otros, Nord 1995:20: Nordic guidelines on life-cycle assessment, 1995). El factor de ponderación W_{ij} puede expresarse como:

$$W_{ij} = \frac{1}{U_j} = \frac{G_j}{R_j} \quad (8)$$

donde R_j es la reserva de mineral j y G_j es el consumo global actual y U_j es la proporción de reserva a uso (Astrup Jensen, y otros, 1997).

D.2 Recursos bióticos

Los recursos abióticos cubren una subcategoría (Finnveden, Part III: "Resources" and related impact categories, 1996):

- recursos (*por ejemplo, fauna (peces, etc.) y flora*)

Los recursos bióticos pueden ser cosechados de una manera no sostenible y sostenible. Como ejemplo, se puede mencionar la explotación de los bosques. En muchas zonas (*por ejemplo, en las selvas tropicales*), la tala de la madera es más rápida que el crecimiento, lo que conduce al agotamiento de los recursos o a una mayor competencia entre las especies. En otras zonas (*por ejemplo, los bosques de coníferas en Escandinavia*) la cosecha de madera es más lenta que la plantación y el crecimiento de los árboles. El uso excesivo de los recursos ambientales también puede influir en el ecosistema, *por ejemplo*, en las especies o en la diversidad genética, con la consiguiente pérdida irreversible de material genético (Astrup Jensen, y otros, 1997).

D.3 Uso de la tierra

El uso y la transformación de la tierra pueden verse desde dos perspectivas (Finnveden, Part III: "Resources" and related impact categories, 1996):

- la tierra como recurso para los seres humanos, es decir, como superficie (*por ejemplo, para la producción de alimentos*)
- uso de la tierra relacionado con la degradación de los ecosistemas y el paisaje, la fragmentación del paisaje, la desecación, las alteraciones del hábitat y los impactos en (*por ejemplo, la biodiversidad*)

El uso y la transformación de la tierra puede ser un efecto reversible, pero dentro de plazos de tiempo de pequeños a grandes (Astrup Jensen, y otros, 1997).

D.4 Calentamiento global

El calentamiento global, o el "efecto invernadero", es el efecto del aumento de la temperatura en la atmósfera baja. La atmósfera inferior se calienta normalmente por la radiación entrante de la atmósfera exterior (del Sol). Una parte de la radiación se refleja normalmente en la superficie del suelo, pero el contenido de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero (*por ejemplo, metano (CH₄), dióxido de nitrógeno (NO₂), clorofluorocarbonos, etc.*) en la atmósfera refleja la radiación IR que produce el efecto invernadero, es decir, un aumento de la temperatura en la atmósfera inferior a un nivel superior al normal. Las posibles consecuencias del efecto invernadero incluyen un aumento del nivel de temperatura que provoca el derretimiento de los casquetes polares, lo que provoca un aumento del nivel del mar. El aumento del nivel de temperatura también puede provocar cambios climáticos regionales.

El potencial de calentamiento global o efecto invernadero se cuantifica normalmente utilizando el potencial de calentamiento global (GWP) de sustancias que tienen el mismo efecto que el CO₂ en reflejo de la radiación térmica. El GWP para los gases de efecto invernadero se expresa como equivalentes de CO₂, es decir, su efecto se expresa en relación con el efecto del CO₂. El potencial de calentamiento global se desarrollada por el "Intergovernmental Panel on Climatic Change" (IPCC) para una serie de sustancias (Albritton, Derwent, Isaksen, Lal, & Wuebbles, 1995). El GWP se basa normalmente en la modelización y se cuantifica para horizontes temporales de 20, 100 o 500 años para una serie de gases de efecto invernadero conocidos (*por ejemplo, CO₂, CH₄, N₂O, CFC, HCFC, HFC y varios hidrocarburos halogenados, etc.*).

Hauschild & Wenzel (Hauschild & Wenzel, Global warming as assessment criteria in the EDIP-method, 1997) sugieren la modelización y cuantificación del GWP para los efectos indirectos de, *por ejemplo, COV* de origen petroquímico, utilizando su potencial de creación de ozono fotoquímico (POCP), como se muestra en la siguiente fórmula:

$$GWP(O_3)_{gas(i)} = GWP(O_3)_{CO} \cdot \frac{POCP_{gas(i)}}{POCP_{CO}} \quad (9)$$

donde $GWP(O_3)_{gas(i)}$ expresa el GWP de oxidación troposférica de gas i , $GWP(O_3)_{CO}$ expresa el GWP de CO, $POCP_{gas(i)}$ expresa la formación fotoquímica total de ozono por oxidación de gas i , y $POCP_{CO}$ expresa la formación de ozono por oxidación de CO.

El potencial de efecto invernadero de un proceso puede estimarse calculando el producto de la cantidad de gas de efecto invernadero emitido por kilogramo de material producido y el potencial de efecto invernadero expresado en kilogramos de equivalentes de CO₂ por kilogramo de cada gas. Por último, hay que resumir la contribución al

potencial efecto invernadero de cada gas. Este esquema de cálculo puede expresarse matemáticamente como:

$$\text{Potencial de efecto invernadero (kg CO}_2\text{ - eq.)} = \sum_i \text{GWP}_i \cdot m_i \quad (10)$$

Si no se puede elegir y justificar un horizonte temporal específico en la definición de los objetivos, se sugiere estimar el efecto invernadero sobre la base del GWP para 20, 100 y 500 años (Lindfors, y otros, Nord 1995:20: Nordic guidelines on life-cycle assessment, 1995; Astrup Jensen, y otros, 1997).

D.5 Agotamiento de la capa de ozono estratosférico

La descomposición de la capa de ozono estratosférica provocará un aumento de la radiación UV entrante, lo que tendrá repercusiones en los seres humanos, como el aumento de los niveles de, *por ejemplo*, cáncer de piel, cataratas y disminución de las defensas inmunitarias, pero también repercusiones en los organismos naturales y los ecosistemas, *por ejemplo*, el plancton en la región del Polo Sur, donde la descomposición de la capa de ozono ya es significativa.

La capa de ozono estratosférico se encuentra a una altitud de 10 a 40 km, con una concentración máxima de 15 a 25 km. La generación máxima de ozono estratosférico (O_3) se produce en la cima de la estratosfera a una altitud de 40 km como resultado de una reacción de oxígeno molecular (O_2) y oxígeno atómico (O). La reacción depende de la radiación UV utilizada en la descomposición del oxígeno y de la disponibilidad de otras moléculas utilizadas en la absorción del exceso de energía del proceso de descomposición.

La descomposición del ozono se ve reforzada por la entrada estratosférica de compuestos halogenados antropogénicos (*por ejemplo*, CFC, HCFC, halones, etc.). La Organización Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organisation*, o WMO) ha presentado el potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP) para una serie de compuestos halogenados (Solomon & Wuebbles, 1994; Pyle, Wuebbles, Solomon, & Zvenigorodsky, 1991; Astrup Jensen, y otros, 1997). El ODP se da como equivalentes de CFC-11, es decir:

$$\text{ODP}_i = \frac{\text{agotamiento del ozono estratosférico modelado debido al compuesto } i}{\text{agotamiento del ozono estratosférico modelado debido a la misma cantidad de CFC - 11}} \quad (11)$$

El potencial agotamiento del ozono estratosférico como efecto de ciertos procesos puede estimarse resumiendo los PAO:

$$\begin{aligned} \text{Potencial de agotamiento del ozono estratosférico (kg equivalentes de CFC - 11)} \\ = S_i \cdot ODP_i^* \cdot m_i \end{aligned} \quad (12)$$

D.6 Impactos ecotoxicológicos

Los impactos ecotoxicológicos dependen de la exposición y los efectos de las sustancias químicas y biológicas. Los efectos potenciales sobre los ecosistemas dependen de la emisión real y del destino de las sustancias específicas emitidas al medio ambiente. Se propone un factor de efecto en la siguiente fórmula para las puntuaciones de efecto (S).

$$S_i^{nm} = E_i^m \cdot F_i^{nm} \cdot M_i^n \quad (13)$$

M es la emisión de una sustancia i a un medio inicial n (aire, agua o suelo), E es el factor de efecto para una sustancia i en el medio m (aire, agua, suelo o cadena alimentaria), y F es el destino y el factor de exposición para una sustancia i emitida a un medio inicial n y transferida al compartimento m.

El destino de las sustancias químicas depende de:

- velocidad de degradación (*aeróbica/anaeróbica, hidrolítica/fotolítica*)
- bioacumulación
- evaporación
- deposición

La tasa de degradación afectará tanto a la posibilidad de que la sustancia reaccione al organismo objetivo como al tipo de efecto tóxico. Las sustancias fácilmente degradables pueden presentar efectos tóxicos agudos dependiendo del tipo y la velocidad de degradación en el medio real, mientras que las sustancias que no son fácilmente degradables pueden bioacumularse en el medio ambiente y/o presentar efectos tóxicos crónicos. Las tasas de evaporación/deposición afectarán a la transferencia de sustancias entre los diferentes medios (*por ejemplo, el aire, el agua, el suelo o las cadenas alimentarias*) en la aireación de las conductas que provocan la evaporación de sustancias volátiles del agua, protegiendo así los procesos biológicos de la planta de tratamiento de aguas residuales contra los posibles efectos tóxicos o inhibidores, pero también sobrecargando el entorno.

Una forma de evaluar los posibles efectos ecotoxicológicos de las sustancias químicas es utilizar los criterios de clasificación de las sustancias como "*peligrosas para el medio ambiente*" (*indicados con el símbolo N*) (EEC, 1993):

- biodegradación
- bioacumulación
- toxicidad acuática (aguda/crónica)

- toxicidad terrestre

Ya existen criterios para evaluar la biodegradación, la bioacumulación y los efectos acuáticos, mientras que no se han desarrollado criterios formalizados para la toxicidad terrestre. En Pedersen et al. (Pedersen, y otros, 1995) se puede encontrar orientación sobre el procedimiento de evaluación real.

Se han desarrollado una serie de métodos diferentes que abordan el destino químico, la vía de exposición y el efecto toxicológico:

Enfoque cuantitativo con análisis de destino parcial (Lindfors, y otros, Nord 1995:20: Nordic guidelines on life-cycle assessment, 1995; Finnveden, Andersson-Sköld, Samuelsson, Zetterberg, & Lindfors)

- Método MUP (Jensen, Schmidt, & Jensen, 1994)
- Método EDIP (Hauschild, Olsen, & Wenzel, Human toxicity as assessment criteria in the EDIP-method, 1997)
- El "*enfoque del potencial de ecotoxicidad*" (Guinée, J.B.; Heijungs, R., 1993; Guinée, y otros, 1996)
- El "*método provisional*" (Heijungs, y otros, 1992)

Todavía no se ha alcanzado un consenso internacional sobre los métodos específicos para evaluar los impactos ecotoxicológicos y el desarrollo de algunos de ellos está aún en curso. Por lo tanto, se recomienda utilizar diferentes métodos para evaluar los posibles impactos ecotoxicológicos de un conjunto específico de datos (Astrup Jensen, y otros, 1997).

D.7 Impactos toxicológicos en humanos

La categoría de impacto "*impactos toxicológicos humanos*" es también de las más difíciles de manejar. Los impactos toxicológicos humanos dependen de la exposición y de los efectos de las sustancias químicas y biológicas. El efecto potencial sobre los seres humanos depende de los impactos ecotoxicológicos sobre la emisión real y el destino de las sustancias específicas emitidas al medio ambiente.

Los efectos toxicológicos en humanos pueden ser:

- efectos toxicológicos agudos
- fastidio
- reacciones alérgicas
- genotoxicidad
- carcinogenicidad
- neurotoxicidad
- teratogenicidad

Se han desarrollado varios métodos diferentes que intentan más o menos tener en cuenta el destino químico, la vía de exposición y el efecto toxicológico. Puede utilizarse un procedimiento de selección para centrarse en las sustancias más peligrosas que pueden evaluarse mediante un procedimiento más detallado (*por ejemplo, Hauschild et al. (Hauschild, M.Z.; Wenzel, H., 1997)*).

- Volúmenes críticos (BUS, 1984; Habersatter, 1991)
- El "método provisional" (Heijungs, y otros, 1992)
- El método Tellus (Tellus Institute, 1992)
- El método MUP (Jelnes, J.E.; Schmidt, A.; Wilhardt, P., 1994; Schmidt, Drabæk, & Midtgaard, 1994)
- El "enfoque del potencial de toxicidad" (Guinée, J.B.; Heijungs, R., 1993; Guinée, y otros, 1996)
- El "tiempo de superficie crítico" (Jolliet, O., 1994; Jolliet, O., 1994; Jolliet, O.; Crettaz, P., 1996)
- El método EDIP (Hauschild, M.Z.; Wenzel, H., 1997)

Todavía no se ha alcanzado un consenso internacional sobre los métodos específicos para evaluar los impactos toxicológicos y el desarrollo de algunos de ellos está todavía en curso. Por lo tanto, se recomienda utilizar diferentes métodos para evaluar los posibles efectos toxicológicos de un conjunto de datos específico (Astrup Jensen, y otros, 1997).

D.8 Formación fotoquímica de oxidantes (smog)

La formación fotoquímica de ozono es causada por la degradación de compuestos orgánicos (COV) en presencia de luz y óxido de nitrógeno (NO_x) ("*smog*" como *impacto local* y "*ozono troposférico*" como *impacto regional*). Los efectos biológicos del ozono fotoquímico pueden atribuirse a los efectos bioquímicos de los compuestos reactivos del ozono. La exposición de las plantas al ozono puede provocar daños en la superficie de las hojas, lo que daña la función fotosintética, la decoloración de las hojas, la muerte de las hojas y, por último, toda la planta. La exposición de los seres humanos al ozono puede provocar irritación ocular, problemas respiratorios y daños crónicos en el sistema respiratorio.

La reacción puede describirse de manera simplificada en términos de cuatro pasos (Nichols, Hauschild, Potting, & White, 1996; Hauschild & Wenzel, Photochemical ozone formation as assessment criteria in the EDIP-method, 1997):

1. Reacción entre los compuestos orgánicos (COV) y los radicales hidroxilos (OH) para formar radicales peróxidos orgánicos.
2. Los radicales peróxidos reaccionan con el óxido de nitrógeno (NO) para formar dióxido de nitrógeno (NO_2).
3. El dióxido de nitrógeno (NO_2) reacciona en presencia de la luz solar para formar óxido de nitrógeno (NO) y átomos de oxígeno.

4. El oxígeno atómico reacciona con el oxígeno (O_2) para formar ozono (O_3).

La formación fotoquímica de ozono puede cuantificarse utilizando el potencial de creación de ozono fotoquímico (POCP) para compuestos orgánicos. El POCP para compuestos orgánicos se expresa como equivalentes de etileno (C_2H_4), es decir, sus impactos se expresan en relación con el efecto de C_2H_4 . Los valores de POCP pueden calcularse de diferentes maneras, como proponen Andersson-Sköld et al. (Andersson-Sköld, Grennfelt, & Pleijel, 1992) y Heijungs et al. (Heijungs, y otros, 1992). Andersson-Sköld et al. (Andersson-Sköld, Grennfelt, & Pleijel, 1992) presentan el POCP para tres escenarios diferentes:

1. Diferencias máximas de concentración
2. Antecedentes suecos ordinarios (NO_x) durante 0 - 4 días
3. Alto fondo de NO_x durante 0 - 4 días

Autores (Heijungs, y otros, 1992) proporcionan POCP calculados como la contribución a la formación de ozono en el momento de máxima formación de ozono, basados en la media de datos de tres lugares diferentes de Europa.

El potencial de creación de ozono fotoquímico de determinados procesos puede estimarse resumiendo el POCP de los COV:

$$POCP \text{ (kg equivalentes de etileno)} = S_i \cdot ODP'_i \cdot m_i \quad (14)$$

Un método que tenga en cuenta únicamente el POCP para los COV no es suficiente para describir la categoría de impacto. Un posible enfoque podría consistir en dividir la categoría en dos subcategorías: una categoría para los óxidos de nitrógeno (*agregados como NO_x*) y una categoría para los COV (*agregados con POCP como factor de ponderación utilizando un escenario apropiado o los cuatro escenarios mencionados anteriormente*), tal como proponen Lindfors et al. (Lindfors, y otros, LCA- Nordic. Technical Reports No. 1 - 9, 1995; Lindfors, y otros, Nord 1995:20: Nordic guidelines on life-cycle assessment, 1995) en la directriz nórdica para la evaluación del ciclo de vida. Si los datos de inventario no permiten calcular el POCP total sobre la base de factores de ponderación debido a la falta de información sobre la composición de los COV, se sugiere que los datos se agreguen en las siguientes subcategorías (Astrup Jensen, y otros, 1997):

1. Óxidos de nitrógeno NO_x
2. Hidrocarburos (HC) o compuestos orgánicos volátiles (COV)
3. Monóxido de carbono (CO)
4. Metano (CH_4)

D.9 Acidificación

La acidificación es causada por la liberación de protones en los ecosistemas terrestres o acuáticos. En el ecosistema terrestre, los efectos se observan en los bosques de coníferas (*por ejemplo, píceas*) como crecimiento ineficiente y como consecuencia final de la muerte del bosque. Estos efectos se observan principalmente en Escandinavia y en la parte central y oriental de Europa. En el ecosistema acuático los efectos son vistos como (*claros*), lagos ácidos sin vida silvestre. Estos efectos se observan principalmente en Escandinavia. Edificios, construcciones, esculturas y otros objetos dignos de conservación también se ven dañados, *por ejemplo*, por la lluvia ácida.

Se considera que las sustancias tienen un efecto de acidificación si producen (Hauschild & Wenzel, Acidification as assessment criteria in the EDIP- method, 1997):

- Suministro o liberación de iones de hidrógeno (H^+) en el medio ambiente
- Lixiviación de los aniones correspondientes del sistema en cuestión

Los efectos potenciales dependen en gran medida de la naturaleza del ecosistema receptor, *por ejemplo*, los óxidos de nitrógeno (NO_x) pueden fijarse en el ecosistema debido a su absorción por las plantas. Este problema puede ser manejado utilizando dos escenarios, como lo sugieren Lindfors et al. (Lindfors, y otros, Nord 1995:20: Nordic guidelines on life-cycle assessment, 1995). En ambos escenarios, el potencial de acidificación de NO_x y NH_3 se calcula como cero y como el valor máximo teórico, respectivamente. Lindfors et al. (Lindfors, y otros, Nord 1995:20: Nordic guidelines on life-cycle assessment, 1995) recomiendan que se consideren las siguientes sustancias: Deben tenerse en cuenta el SO_2 , NO_x , NH_3 y HCl , así como otras sustancias con efecto liberador de protones (*es decir, otros compuestos de azufre y otros ácidos*). El potencial de acidificación (AP) puede estimarse como equivalentes de SO_2 o como hidrógeno molar (H^+) (Astrup Jensen, y otros, 1997).

El efecto potencial de acidificación de un proceso determinado puede calcularse resumiendo los potenciales de acidificación de las sustancias reales:

$$\text{Potencial de acidificación (SO}_2\text{ - equivalente)} = \sum_i AP_i \cdot m_i \quad (15)$$

D.10 Eutrofización

La eutrofización (*o enriquecimiento de nutrientes*) de los ecosistemas acuáticos y terrestres puede ser causada por excedentes de nitrógeno, fósforo y sustancias orgánicas degradables. La eutrofización puede definirse como:

El enriquecimiento de los ecosistemas acuáticos con nutrientes que conduce a un aumento de la producción de algas de plancton y plantas acuáticas superiores, lo que conduce a un deterioro de la calidad del agua y a una reducción del valor de la utilización del ecosistema acuático.

El principal efecto del exceso de nitrógeno y fósforo en los ecosistemas acuáticos es el crecimiento de algas. El efecto secundario es la descomposición de materia orgánica muerta (*por ejemplo, algas*) y sustancias orgánicas antropogénicas. La descomposición de la materia orgánica es un proceso que consume oxígeno, lo que lleva a una disminución de la saturación de oxígeno y, a veces, a condiciones anaeróbicas. Las condiciones anaeróbicas en el sedimento en el fondo de lagos u otras aguas continentales pueden dar lugar, además, a la producción de sulfuro de hidrógeno (H_2S), lo que puede dar lugar a incidentes de "abajo hacia arriba" y a la liberación de sulfuro de hidrógeno tóxico al agua circundante. Los posibles efectos de las emisiones que provocan la eutrofización dependen de las aguas receptoras, es decir, algunos receptores son sensibles al suministro de nutrientes y otros no.

Los efectos de la eutrofización de los ecosistemas terrestres se observan en los cambios en la función y diversidad de las especies en los ecosistemas pobres en nutrientes como brezales, brezales de dunas, turberas elevadas, etc., y son causados por la deposición atmosférica de compuestos de nitrógeno.

Lindfors et al. (Lindfors, y otros, Nord 1995:20: Nordic guidelines on life-cycle assessment, 1995) presentan dos métodos para calcular el potencial de eutrofización:

- 1) un método de agregación separado
- 2) un enfoque basado en escenarios

El método de agregación separada divide las cargas en cuatro subcategorías que se calcularán por separado:

1. Materia orgánica en el agua medida como DBO₅
2. N total en el agua en kg N
3. P total en el agua en kg P
4. N total en el aire en kg N

En el enfoque basado en escenarios, se sugiere que la categoría de eutrofización se divida en dos subcategorías que consideran los ecosistemas acuáticos y los ecosistemas terrestres, respectivamente. La razón para usar el enfoque basado en escenarios es tomar en cuenta las condiciones de los ecosistemas receptores, porque P es el factor limitante en algunas circunstancias y N es el factor limitante en otras. Se supone que solo el factor limitante contribuye a la eutrofización y, por lo tanto, la agregación puede realizarse en las siguientes subcategorías:

1. N total en el aire (efectos terrestres)
2. Emisiones totales de P y emisión de materia orgánica al agua
3. Emisiones totales de N y emisión de materia orgánica al agua
4. Emisiones totales de N y emisiones de materia orgánica al agua y emisiones de N a la atmósfera.
5. Emisiones totales de P y N a la atmósfera y al agua, así como emisiones de materia orgánica al agua (*suponiendo que contribuyen tanto N, P como materia orgánica*).

El potencial de eutrofización (EP) puede expresarse en equivalentes de O₂ o PO₄. Hauschild & Wenzel (Hauschild & Wenzel, Nutrient enrichment as assessment criteria in the EDIP-method, 1997) han calculado el EP como equivalentes de N total, P total y NO₃.

El potencial de eutrofización de un determinado proceso puede estimarse resumiendo los factores de eutrofización de la materia orgánica y de las sustancias que contienen P y N:

$$\text{Potencial de eutrofización (O}_2\text{ - equivalente)} = \sum_i \text{Potencial de eutrofización}_i \cdot m_i \quad (16)$$

La eutrofización también puede expresarse como equivalentes de PO₄³⁻. En este enfoque, no se hace ninguna diferenciación entre ecosistemas limitados por diferentes nutrientes (Lindfors, y otros, Nord 1995:20: Nordic guidelines on life-cycle assessment, 1995; Astrup Jensen, y otros, 1997).

D.11 Entorno de trabajo

La categoría de impacto "*entorno de trabajo*" abarca los mismos efectos que los mencionados en el subcapítulo sobre los impactos toxicológicos humanos, complementados por efectos no químicos. Los efectos toxicológicos humanos causados por la exposición a sustancias biológicas o químicas pueden serlo:

- Efectos toxicológicos agudos
- Irritación
- Reacciones alérgicas
- Genotoxicidad
- Carcinogenicidad
- Neurotoxicidad
- Teratogenicidad

A diferencia de la evaluación de los efectos toxicológicos en el ser humano causados por las emisiones ambientales, la evaluación de los efectos en el ambiente de trabajo

requiere información sobre los niveles reales de concentración. La información sobre los niveles de concentración en el entorno laboral normalmente no se incluye en el inventario.

Los efectos no químicos causados por el calor, el ruido, las condiciones monótonas de trabajo, *por ejemplo*, el trabajo repetitivo, pueden serlo:

- Problemas de audición
- Daño psicológico
- Dolor en los músculos
- Dolor en las articulaciones

Los accidentes pueden ocasionar lesiones corporales o efectos toxicológicos agudos causados por fugas accidentales, etc. Los efectos toxicológicos humanos en el ambiente de trabajo difieren de los efectos causados por las emisiones de las mismas sustancias desde la producción al ambiente externo, resultando en efectos sustanciales en unas pocas personas, mientras que los efectos toxicológicos humanos en el ambiente externo se caracterizan por pequeños efectos en muchas personas (Bengtsson & Berglund, 1996).

Se han desarrollado varios métodos diferentes para evaluar el ambiente de trabajo en relación con la evaluación del ciclo de vida y se han presentado y comparado en un taller organizado por LKANET (Potting, Møller, & Jensen, 1997):

- Metodología química (Terwoert, Proceedings of the Workshop Life Cycle Assessment and the Working Environment, 1994; Terwoert, Workshop paper Life Cycle Assessment and the Working Environment, 1994; Terwoert, Occupational health from cradle to grave. Feasibility study of the integration of the work environment in Life Cycle Assessment (LCA's) of products, 1994)
- Metodología EDIP (Rasmussen, 1997)
- Metodología FIV (Bengtsson & Berglund, 1996)
- Metodología IVL (Antonsson & Carlsson, 1995)
- Metodología MUP (Jelnes, J.E.; Schmidt, A.; Wilhardt, P., 1994; Schmidt, Drabæk, & Midtgaard, 1994)
- Metodología PVC (Christiansen, y otros, 1993)
- Metodología STØ (Bjørnsen, Hanssen, & Møller, 1995; Møller, Førde, Vold, & Hanssen, 1995; Rønning, Hanssen, & Møller, 1995; Økstad, Larsen, & Hanssen, 1994)

Todavía no se ha alcanzado un consenso internacional sobre los métodos específicos para evaluar el entorno de trabajo y el desarrollo de algunos de ellos está todavía en curso (Astrup Jensen, y otros, 1997).

ANEXO E

Artículos complementarios

ARTÍCULOS COMPLEMENTARIOS

Este Anexo incluye artículos científicos del doctorado y que tiene cierta relación y/o pertenecen al área de investigación en el que se desarrolla esta Tesis Doctoral.



Use of marble sludge waste in the manufacture of eco-friendly materials: applying the principles of the Circular Economy

Carlos Javier Cobo-Ceacero¹ · María Teresa Cotes-Palomino¹ · Carmen Martínez-García¹ · José Manuel Moreno-Maroto¹ · Manuel Uceda-Rodríguez¹

Received: 12 November 2018 / Accepted: 4 April 2019 / Published online: 18 April 2019
 © Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2019

Abstract

The marble industry generates enormous amounts of waste every year, whose incorrect management can lead to environmental problems. The Circular Economy model can provide an effective solution to this issue, an aspect that has been addressed in this research. The suitability of a marble sludge generated in the ornamental rock industry of Andalusia (Spain) has been assessed as raw material in ceramic bricks. Mixtures containing a clayey base and 0, 2.5, 5, 7.5, and 10 wt% of marble powder have been shaped into 60 × 30 × 10-mm³ prismatic specimens and sintered at 950 °C in a muffle. The main technological properties of the bricks related to color, shrinkage, porosity, water absorption, suction, and compressive strength have been determined. The addition of marble sludge has fostered the development of a lighter color, together with a significant increase of the open porosity. This aspect has implied, on the one hand, higher water absorption and suction results and, on the other hand, a decrease of the density and the mechanical strength. The correlations obtained after applying Shapiro-Wilk normality tests and *r* Pearson coefficients endorse the clear relationship between the addition of marble powder and the abovementioned effects on the technological properties of the sintered bricks. All the measured properties fully meet the brick standardized requirements, which would indicate that the recycling of marble wastes could be a promising alternative to obtain eco-friendly lightweight ceramic materials.

Keywords Brick · Ceramics · Eco-friendly materials · Circular Economy · Marble sludge · Porosity · Waste management

Introduction

The currently preponderant linear economic model is based on the sequence “take-extract, produce, consume and

throw away”. Nevertheless, the reckless use of material and energy resources has made this economic model unsustainable from an environmental perspective (Steffen et al. 2015; Cerdá and Khalilova 2016). In the case of marble, its sector is booming in Spain, a country that is currently the seventh largest marble producer in the world and whose production is especially preponderant at the Eastern Andalusia area. The marble cutting industry has a worldwide production of around 236,000 tonnes, which is in turn associated with the generation of large volumes of enriched calcium-carbonate sludge. This sludge may lead to a negative environmental impact if it is not correctly managed (Trio Maseda and Ortuño 2017).

However, the Circular Economy model can be a potential solution to the problem of marble waste. The alternative “restorative” approach of the Circular Economy aims not only to preserve resources, components, and materials, but also to maximize their level of use by recovering, reusing, and recycling strategies. Thus, the Circular Economy principles embrace a cycle of positive continuous development to protect natural capital, optimize returns on resources, minimize

Responsible editor: Philippe Garrigues

✉ Carmen Martínez-García
 cmartin@ujaen.es

Carlos Javier Cobo-Ceacero
 cjcobo@ujaen.es

María Teresa Cotes-Palomino
 mtcotes@ujaen.es

José Manuel Moreno-Maroto
 jmmaroto@ujaen.es

Manuel Uceda-Rodríguez
 muceda@ujaen.es

¹ Department of Chemical, Environmental and Materials Engineering, Technological Scientific Campus of Linares, University of Jaén, 23700 Linares, Jaén, Spain



Artículo

Utilización de residuos de lodos de mármol en la fabricación de materiales ecológicos: aplicación de los principios de la Economía Circular

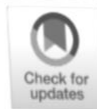
Carlos Javier Cobo-Ceacero, Teresa Cotes-Palomino, Carmen Martínez-García *, José Manuel Moreno-Maroto and Manuel Uceda-Rodríguez

Tabla 46. Información de la primera publicación complementaria

Revista	ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH			
Volumen	26	Número	35	
Páginas	35399-35410			
Recibido	12 de noviembre de 2018	Aceptado	4 de abril de 2019	
Publicado	18 de abril de 2019			
DOI	10.1007/s11356-019-05098-x		Veces citado	19
Indicio de calidad	2019 JOURNAL IMPACT FACTOR (JIF):		3.056	
Categoría	Rango JIF	Cuartil JIF	Percentil JIF	
Environmental Sciences	99/265	Q2	62,83	

Resumen: La industria del mármol genera cada año enormes cantidades de residuos, cuya incorrecta gestión puede acarrear problemas medioambientales. El modelo de Economía Circular puede aportar una solución eficaz a esta cuestión, aspecto que se ha abordado en esta investigación. Se ha evaluado la idoneidad de un lodo marmóreo generado en la industria de rocas ornamentales de Andalucía (España) como materia prima en ladrillos cerámicos. Mezclas conteniendo una base arcillosa y 0, 2,5, 5, 7,5, y 10 % en peso de polvo de mármol han sido conformadas en probetas prismáticas de 60 × 30 × 10 mm³ y sinterizadas a 950 °C en mufla. Se han determinado las principales propiedades tecnológicas de los ladrillos relacionadas con el color, la contracción, la porosidad, la absorción de agua, la succión y la resistencia a la compresión. La adición de lodos de mármol ha favorecido el desarrollo de un color más claro, junto con un aumento significativo de la porosidad abierta. Este aspecto ha implicado, por un lado, mayores resultados de absorción de agua y succión y, por otro, una disminución de la densidad y la resistencia mecánica. Las correlaciones obtenidas tras aplicar las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk y los coeficientes r Pearson avalan la clara relación entre la adición de polvo de mármol y los efectos mencionados sobre las propiedades tecnológicas de los ladrillos sinterizados. Todas las propiedades medidas cumplen plenamente los requisitos normalizados de los ladrillos, lo que indicaría que el reciclado de residuos de mármol podría ser una alternativa prometedora para obtener materiales cerámicos ligeros respetuosos con el medio ambiente.

Palabras clave: evaluación del ciclo de vida; residuos industriales; economía circular; áridos ligeros; reciclado de residuos



Ternary diagrams as a tool for developing ceramic materials from waste: relationship between technological properties and microstructure

Rosendo Jesús Galán-Arboledas¹ · María Teresa Cotes-Palomino² · Carmen Martínez-García² · José Manuel Moreno-Maroto¹ · Manuel Uceda-Rodríguez¹ · Salvador Bueno^{1,2}

Received: 19 November 2018 / Accepted: 1 May 2019 / Published online: 17 May 2019
 © Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2019

Abstract

The present work proposes the manufacture of ceramic construction materials using raw materials which are only industrial wastes from different production processes (electric arc furnace steel slag, coal bottom ash, carbon fly ash, and oil-filtering diatomaceous-earth). From them, the $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ equilibrium phase diagram has been used to formulate two materials compositions with the objective of obtaining ceramics whose chemical composition is located in the same area as a traditional clay-based material, but with two different technological behaviors: refractoriness due to calcium phase's development and densification due to a greater melting capacity. The waste-based pieces have been sintered at three firing temperatures (1000 °C, 1050 °C, and 1100 °C) and the mineralogical composition has been quantified by Rietveld refinement-XRD in order to establish the agreement between the phases foreseen by the formulations in the diagrams and the mineralogical compositions actually developed after the sintering treatment. In addition, fired materials have been subjected to a complete microstructural characterization by means of SEM-EDX and the pore size distribution has been determined by means of mercury intrusion porosimetry and helium pycnometry. In general, all obtained materials display adequate technological properties for their use as building materials so this characterization has allowed to show the suitability of the ternary diagram $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ for the design of ceramic compositions from industrial wastes. Therefore, extending the use of phase diagrams as a design tool is still little explored for waste-based ceramics, and those that have been mainly used for studying Mg-based phases can have an important contribution to a more sustainable construction sector.

Keywords Waste · Ceramic materials · Ternary phase diagram · Technological properties · Microstructure

Introduction

Currently, the way to measure the environmental impact and the carbon footprint associated with a product, process, or

service can be done in different ways, but the eco-design and life cycle analysis, LCA, are the most widely used methodologies. These are endorsed in an international regulatory framework, conforming the base for obtaining environmental

Responsible editor: Philippe Garrigues

✉ Rosendo Jesús Galán-Arboledas
 tecnico@innovarcilla.es

María Teresa Cotes-Palomino
 mtcotes@ujaen.es

Carmen Martínez-García
 cmartin@ujaen.es

José Manuel Moreno-Maroto
 jimmaroto@ujaen.es

Manuel Uceda-Rodríguez
 muceda@ujaen.es

Salvador Bueno
 jsbueno@ujaen.es

¹ Fundación Innovarcilla, Pol. Ind. El Cruce, C/ Los Alamillos, 25, 23710 Bailén, Jaén, Spain

² Department of Chemical, Environmental and Materials Engineering, Technological Scientific Campus of Linares, University of Jaén, 23700 Linares, Jaén, Spain



Artículo

Diagramas ternarios como herramienta para el desarrollo de materiales cerámicos a partir de residuos: relación entre propiedades tecnológicas y microestructura

Rosendo Jesús Galán-Arboledas, Teresa Cotes-Palomino, Carmen Martínez-García, José Manuel Moreno-Maroto, Manuel Uceda-Rodríguez y Salvador Bueno

Tabla 47. Información de la segunda publicación complementaria

Revista	ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH		
Volumen	Número	Páginas	
26	35	35574-35587	
Recibido	Aceptado	Publicado	
19 de noviembre de 2018	1 de mayo de 2019	17 de mayo de 2019	
DOI	10.1007/s11356-019-05343-3	Veces citado	3
Indicio de calidad	2019 JOURNAL IMPACT FACTOR (JIF):		3.056
Categoría	Rango JIF	Cuartil JIF	Percentil JIF
Environmental Sciences	99/265	Q2	62,83

Resumen: En el presente trabajo se propone la fabricación de materiales cerámicos de construcción a partir de materias primas que no son más que residuos industriales procedentes de diferentes procesos productivos (escorias siderúrgicas de horno de arco eléctrico, cenizas de fondo de carbón, cenizas volantes de carbón y tierra de diatomeas filtrante de aceites). Se ha utilizado el diagrama de fases de equilibrio $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ para formular dos composiciones de materiales con el objetivo de obtener cerámicas cuya composición química se sitúe en la misma zona que un material tradicional de base arcillosa, pero con dos comportamientos tecnológicos diferentes: refractariedad debida al desarrollo de la fase cálcica y densificación debida a una mayor capacidad de fusión. Las piezas a base de residuos se han sinterizado a tres temperaturas de sinterización (1000 °C, 1050 °C y 1100 °C) y la composición mineralógica se ha cuantificado mediante refinamiento Rietveld-XRD para establecer la concordancia entre las fases previstas por las formulaciones de los diagramas y las composiciones mineralógicas realmente desarrolladas tras el tratamiento de sinterización. Por tanto, la extensión del uso de los diagramas de fases como herramienta de diseño está aún poco explorada para cerámicas a partir de residuos, y los que se han utilizado principalmente para el estudio de fases a base de Mg pueden tener una importante contribución a un sector de la construcción más sostenible.

Palabras clave: residuos; materiales cerámicos; diagrama de fases ternario; propiedades tecnológicas; microestructura



Recycling of 'alperujo' (olive pomace) as a key component in the sintering of lightweight aggregates

José Manuel Moreno-Maroto ^a, Manuel Uceda-Rodríguez ^a, Carlos Javier Cobo-Ceacero ^a,
Mónica Calero de Hoces ^b, María Ángeles MartínLara ^b, Teresa Cotes-Palomino ^a,
Ana B. López García ^a, Carmen Martínez -García ^{a, *}

^a Department of Chemical, Environmental and Materials Engineering, Higher Polytechnic School of Linares, University of Jaen, Scientific and Technological Campus of Linares, 23700, Linares, Jaén, Spain

^b Department of Chemical Engineering, University of Granada, 18071, Granada, Spain



ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 June 2019
Received in revised form
12 August 2019
Accepted 13 August 2019
Available online 17 August 2019

Handling Editor: Sandro Nizetic

Keywords:

Alperujo
Olive pomace
Lightweight aggregate
Waste recycling
Circular economy

ABSTRACT

The current environmental problems that threaten our society can only be mitigated with a radical change in the paradigm of production and consumption. Recycling waste is a key element in this. This work has focused on the valorization of a widely spread agricultural waste: the so-called 'alperujo' (olive pomace). For the first time, olive pomace (OP) has been used as a component in the manufacture of lightweight aggregates (LWAs). Mixtures with 0, 1.25, 2.5, 5 and 10 wt% OP have been prepared from three different clays. The research results show that the addition of OP in low proportions (mainly 2.5%) is more positive to achieve aggregate bloating, pore formation and a lighter structure. The high calorific value of OP also helps to reduce the firing temperature significantly, which would result in energy savings. In the same way, bloating would be favored with the increase of the time and the temperature, especially with this last one. The materials obtained have excellent properties. In addition, the study of leachate in the most expanded aggregate shows that the concentration of heavy metals is very low, representing no danger to the environment. According to these findings, the recycling of olive pomace can be an excellent alternative in the manufacture of LWAs.

© 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

According to the data recorded by the International Olive Council from 1990 until today, the olive sector is of great economic importance in a large number of countries (IOC, 2019a). The annual production of table olive has tripled in the last thirty years, estimating a production close to 3 million tonnes for the period 2018–2019 (IOC, 2019a). Something similar happens with olive oil, whose production in the period 1990–1991 was approximately 1.4 million tonnes, while it is expected to exceed 3.1 million tonnes at the end of the period 2018–2019 (IOC, 2019b). This would indicate not only that the sector is maintaining itself, but that it is also booming.

Spain is historically the largest producer of olive oil in the world, generating more than 1.2 million tonnes per year based on data from the last triennium (IOC, 2019b). Specifically, Andalusia (southern Spain) is one of the main producing regions of olive products worldwide, with an agro-industrial network consisting of more than 1000 facilities dedicated to olive processing, most of them for the production of olive oil (AGAPA, 2015). As a consequence of the activity of this sector, large volumes of waste and by-products are generated. These by-products mainly include the *hojín* (leaf), the olive stone and the *alperujo* (AGAPA, 2015), although, the olive stone could also be considered as a phase within the *alperujo* (De la Casa et al., 2012).

'Alperujo' is the olive pomace (also called wet pomace), a combination of olive husk and pulp (~20 wt%), crushed olive stone (~15 wt%) and olive mill waste water (De la Casa et al., 2012), reaching a moisture content of around 65% (Arjona et al., 1999). According to the results estimated by AGAPA (2015), from the 5.8 million tonnes of olives that are processed on average annually in the olive agro-industries, more than 4 million tonnes of olive

* Corresponding author.

E-mail addresses: jmmaroto@ujaen.es (J.M. Moreno-Maroto), muceda@ujaen.es (M. Uceda-Rodríguez), cjcobero@ujaen.es (C.J. Cobo-Ceacero), mtcotes@ujaen.es (T. Cotes-Palomino), ablopez@ujaen.es (A.B. López García), cmartin@ujaen.es (C. Martínez -García).

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118041>
0959-6526/© 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.



Artículo

Reciclado de alperujo como componente clave en la sinterización de áridos ligeros

José Manuel Moreno-Maroto, Manuel Uceda-Rodríguez, Carlos Javier Cobo-Ceacero, Mónica Calero de Hoces, María Ángeles MartínLara, Teresa Cotes-Palomino, Ana B. López-García y Carmen Martínez-García

Tabla 48. Información de la tercera publicación complementaria

Revista	JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION		
Volumen	Número	Páginas	
239	-	118041	
Recibido	Aceptado	Publicado	
2 de junio de 2019	13 de agosto de 2019	22 de agosto de 2019	
DOI	10.1016/j.jclepro.2019.118041	Veces citado	35
Indicio de calidad	2019 JOURNAL IMPACT FACTOR (JIF):		7.246
Categoría	Rango JIF	Cuartil JIF	Percentil JIF
Green & Sustainable Science & Technology	8/53	Q1	85,85
Engineering, Environmental	19/265	Q1	93,02
Environmental Sciences	6/41	Q1	86,59

Resumen: Los actuales problemas medioambientales que amenazan a nuestra sociedad sólo pueden mitigarse con un cambio radical del paradigma de producción y consumo. El reciclaje de residuos es un elemento clave para ello. Este trabajo se ha centrado en la valorización de un residuo agrícola muy extendido: el llamado «alperujo». Por primera vez, el orujo de oliva (OP) se ha utilizado como componente en la fabricación de áridos ligeros (AGL). Se han preparado mezclas con 0, 1,25, 2,5, 5 y 10 % en peso de OP a partir de tres arcillas diferentes. Los resultados de la investigación muestran que la adición de OP en proporciones bajas (principalmente 2,5%) es más positiva para conseguir la expansión de los áridos, la formación de poros y una estructura más ligera. El alto poder calorífico del OP también ayuda a reducir significativamente la temperatura de sinterización, lo que supondría un ahorro de energía. Del mismo modo, la expansión se vería favorecida con el aumento del tiempo y la temperatura, especialmente con esta última. Los materiales obtenidos presentan excelentes propiedades. El estudio de los lixiviados en el árido más expandido muestra que la concentración de metales pesados es muy baja, no representando ningún peligro para el medio ambiente. De acuerdo con estos resultados, el reciclado del orujo de oliva puede ser una excelente alternativa en la fabricación de LWA.

Palabras clave: alperujo; orujo de oliva; árido ligero; reciclado de residuos; economía circular



Studying the feasibility of a selection of Southern European ceramic clays for the production of lightweight aggregates

José Manuel Moreno-Maroto^a, Manuel Uceda-Rodríguez^a, Carlos Javier Cobo-Ceacero^a,
Teresa Cotes-Palomino^a, Carmen Martínez-García^{a,*}, Jacinto Alonso-Azcárate^b

^a Department of Chemical, Environmental and Material Engineering, Higher Polytechnic School of Linares, University of Jaen, Scientific and Technological Campus of Linares, 23700 Linares (Jaén), Spain

^b University of Castilla-La Mancha, Department of Physical Chemistry, Faculty of Environmental Sciences and Biochemistry, Avenida Carlos III, s/n, 45071 Toledo, Spain

HIGHLIGHTS

- Southern European clays have been studied to produce lightweight aggregates (LWAs).
- A high proportion of phyllosilicates improves plasticity but favors pellet bursting.
- High sand content and $\text{SiO}_2/\Sigma\text{Flux}$ and low MgO require greater working temperatures.
- Iron content promotes bloating.
- High quality LWAs have been obtained, which could mean a new market line.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 19 July 2019
Received in revised form 22 October 2019
Accepted 11 November 2019
Available online 26 November 2019

Keywords:

Lightweight aggregate
Clay
Bloating
Pelletizing
Energy consumption
Bursting

ABSTRACT

Nine clays traditionally used in the ceramic brick and tile sector in Southern Europe were evaluated for the production of lightweight aggregates: four from Spain, three from Portugal and two from Italy. The clays' suitability was thoroughly examined according to their capacity for pelletizing, their tendency to burst during heating, the firing temperature and their technological properties. A greater proportion of phyllosilicates over nonplastic components is directly related to the bursting of the pellets during pre-heating. Increased sand contents and $\text{SiO}_2/(\Sigma\text{Flux} = \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ ratios are connected to higher firing temperatures, the opposite occurring with the MgO percentage. Those clays with a higher iron content (highlighting in this study the two Italian clays and the Spanish red one) would be more optimal for the development of an expanded structure. The findings of this work show that Southern Europe holds clay deposits with enormous potential in the production of lightweight aggregates. In particular, the red clay from the Zocca deposit (Italy) is remarkable for its excellent characteristics for the production of expanded lightweight aggregates (bloating index of 24.4% and loose bulk density of 0.47 g/cm^3). These raw materials could have a new market line due to the multiple applications of lightweight aggregate in construction (lightweight concrete), horticulture as well as in civil and environmental engineering.

© 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Aggregate is the second most consumed raw material by man only behind water. Its sector is the main supplier of raw materials for the construction of infrastructures and buildings, as well as for

* Corresponding author.
E-mail addresses: jmmaroto@ujaen.es (J.M. Moreno-Maroto), muceda@ujaen.es (M. Uceda-Rodríguez), cjcobo@ujaen.es (C.J. Cobo-Ceacero), mtcotes@ujaen.es (T. Cotes-Palomino), cmartinez@ujaen.es (C. Martínez-García), jacinto.alonso@uclm.es (J. Alonso-Azcárate).

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117583>
0950-0618/© 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

industry and environmental protection, which confers it a clearly strategic character [1]. Although the consumption of artificial lightweight aggregates is significantly lower than that of natural aggregates (<1% in the former compared to 99% in the latter, according to 2017 data from the Spanish sector [2]), the low density, high porosity, inert character and reasonable mechanical strength of lightweight aggregate, make its applications extend in a multitude of fields [3]: lightweight concrete (decreasing not only its density, but also favoring internal curing), masonry, pavements, geotechnical engineering, water treatments, green roofs or horticulture, among others. Although the lightweight aggregate sector has



Artículo

Estudio de la viabilidad de una selección de arcillas cerámicas del sur de Europa para la producción de áridos ligeros

José Manuel Moreno-Maroto, Manuel Uceda-Rodríguez, Carlos Javier Cobo-Ceacero, Teresa Cotes-Palomino, Carmen Martínez-García y Jacinto Alonso-Azcárate

Tabla 49. Información de la cuarta publicación complementaria

Revista	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS		
Volumen	Número	Páginas	
237	-	117583	
Recibido	Aceptado	Publicado	
19 de julio de 2019	11 de noviembre de 2019	26 de noviembre de 2019	
DOI	10.1016/j.conbuildmat.2019.117583	Veces citado	46
Indicio de calidad	2019 JOURNAL IMPACT FACTOR (JIF):		4.419
Categoría	Rango JIF	Cuartil JIF	Percentil JIF
Materials Science, Multidisciplinary	86/314	Q2	72,77
Engineering, Civil	11/134	Q1	92,16
Construction & Building Technology	10/63	Q1	84,92

Resumen: Se evaluaron nueve arcillas utilizadas tradicionalmente en el sector de los ladrillos y baldosas cerámicos del sur de Europa para la producción de áridos ligeros: cuatro de España, tres de Portugal y dos de Italia. Se examinó a fondo la idoneidad de las arcillas en función de su capacidad de granulación, su tendencia a reventar durante el calentamiento, la temperatura de sinterización y sus propiedades tecnológicas. Una mayor proporción de filosilicatos sobre los componentes no plásticos está directamente relacionada con el estallido de los áridos durante el precalentamiento. El aumento del contenido de arena y de la proporción $\text{SiO}_2/(\sum \text{Flux} = \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ está relacionado con temperaturas de sinterización más elevadas, ocurriendo lo contrario con el porcentaje de MgO. Aquellas arcillas con mayor contenido en hierro (destacando en este estudio las dos arcillas italianas y la roja española) serían más óptimas para el desarrollo de una estructura expandida. Los resultados de este trabajo muestran que el sur de Europa alberga yacimientos de arcillas con un enorme potencial en la producción de áridos ligeros. Estas materias primas podrían tener una nueva línea de mercado debido a las múltiples aplicaciones de los áridos ligeros en la construcción (hormigón ligero), la horticultura y la ingeniería civil y medioambiental.

Palabras clave: áridos ligeros; arcilla; expansión; peletización; consumo de energía; estallido



Unraveling the expansion mechanism in lightweight aggregates: Demonstrating that bloating barely requires gas

José Manuel Moreno-Maroto^{a,*}, Carlos Javier Cobo-Ceacero^a, Manuel Uceda-Rodríguez^a,
Teresa Cotes-Palomino^a, Carmen Martínez García^a, Jacinto Alonso-Azcárate^b

^a Department of Chemical, Environmental and Material Engineering, Higher Polytechnic School of Linares, University of Jaén, Scientific and Technological Campus of Linares, 23700 Linares (Jaén), Spain

^b University of Castilla-La Mancha, Department of Physical Chemistry, Faculty of Environmental Sciences and Biochemistry, Avenida Carlos III, s/n, 45071 Toledo, Spain

HIGHLIGHTS

- Lightweight aggregate (LWA) bloating has been studied in an archetypal clay.
- LWA expansion process consists of three stages: preheating, shrinkage and bloating.
- The gas involved in bloating represents less than 0.1% of the original weight.
- Only 0.06–0.2% of carbonates or 0.2–1% of Fe_2O_3 are involved in bloating.
- Adequate viscosity is more decisive for bloating than gas release capacity.

ARTICLE INFO

Article history:
Received 22 November 2019
Received in revised form 22 February 2020
Accepted 25 February 2020
Available online 6 March 2020

Keywords:
Bloating
Expanded clay
Gas release
Lightweight aggregate
Porosity

ABSTRACT

Lightweight aggregate bloating process has been studied by a simple experiment using an archetypal clay to know the actual amount of gas involved in expansion. Considering the relationship between gas loss (LOI) and volumetric changes over time, three main stages are identified: 1) a preheating stage of massive gas loss (close to 80% of the total) with hardly any volumetric change; 2) a very brief transition stage, in which sintering (shrinkage) and closed (micro)porosity formation begin, accompanied by a sudden gas loss (close to 100% of the total); 3) the bloating stage itself, in which an appropriate viscosity is reached, allowing the available residual gas (<0.1 wt%) to increase the aggregate volume due to the growth in size of the micropores formed in the transition phase and probably also to the development of new porosity. Therefore, the proportion of gas-generating components estimated to obtain a highly expanded lightweight aggregate would be much lower than previously thought: e.g., only 0.06 to 0.2% of carbonates (calcite or dolomite) or 0.2 to 1% of Fe_2O_3 would actually be involved in bloating. These results suggest that obtaining an adequate viscosity appears to be much more decisive for bloating than gas release capacity.

© 2020 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

As defined in the European standards [1], the term *aggregate* refers to a granular material primarily intended for construction. The aggregates industry is the largest provider of raw materials for building construction and infrastructures, being also fundamental in other industrial sectors as well as in the protection of

the environment. All this entails that aggregate is the second most consumed raw material, surpassed only by water, which makes the aggregate sector highly strategic [2].

Among the different types of aggregates, *lightweight aggregate* (LWA) is characterized by its low density, exhibiting values of less than 1.20 g/cm³ or 2.00 g/cm³ of loose bulk density or particle density (oven dry density), respectively [1].

Four main classes of lightweight aggregates can be defined as a function of the origin and type of processing: *recycled, industry by-products, natural and artificial* [1,3–5]. The 'artificial' type is the most widespread, representative and growing category, considering that most of the LWA industry as well as the associated research are focused on this line. Artificial lightweight aggregate

* Corresponding author.
E-mail addresses: jmmaroto@ujaen.es (J.M. Moreno-Maroto), cjacob@ujaen.es (C.J. Cobo-Ceacero), muceda@ujaen.es (M. Uceda-Rodríguez), mtcotes@ujaen.es (T. Cotes-Palomino), cmartin@ujaen.es (C. Martínez García), jacinto.alonso@uclm.es (J. Alonso-Azcárate).

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118583>
0950-0618/© 2020 Elsevier Ltd. All rights reserved.



Artículo

Desentrañar el mecanismo de expansión en los áridos ligeros: Demostrando que la expansión apenas requiere gas

José Manuel Moreno-Maroto, Carlos Javier Cobo-Ceacero, Manuel Uceda-Rodríguez, Teresa Cotes-Palomino, Carmen Martínez-García y Jacinto Alonso-Azcárate

Tabla 50. Información de la quinta publicación complementaria

Revista	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS		
Volumen	Número	Páginas	
247	-	118583	
Recibido	Aceptado	Publicado	
22 de noviembre de 2019	25 de febrero de 2019	6 de marzo de 2020	
DOI	10.1016/j.conbuildmat.2020.118583	Veces citado	35
Indicio de calidad	2020 JOURNAL IMPACT FACTOR (JIF):		6.141
Categoría	Rango JIF	Cuartil JIF	Percentil JIF
Materials Science, Multidisciplinary	86/334	Q2	74,70
Engineering, Civil	7/137	Q1	95,26
Construction & Building Technology	7/67	Q1	90,30

Resumen: El proceso de expansión de los áridos ligeros se ha estudiado mediante un sencillo experimento en el que se ha utilizado una arcilla arquetípica para conocer la cantidad real de gas que interviene en la expansión. Considerando la relación entre la pérdida de gas (LOI) y los cambios volumétricos en el tiempo, se identifican tres etapas principales: 1) una etapa de precalentamiento de pérdida masiva de gas (cercana al 80% del total) sin apenas cambios volumétricos; 2) una etapa de transición muy breve, en la que comienza la sinterización (contracción) y la formación de (micro)porosidades cerradas, acompañada de una súbita pérdida de gas (cercana al 100% del total); 3) la etapa de expansión propiamente dicha, en la que se alcanza una viscosidad adecuada que permite que el gas residual disponible (<0.1% en peso) aumente el volumen del árido debido al aumento de tamaño de los microporos formados en la fase de transición y probablemente también al desarrollo de nueva porosidad. Por lo tanto, la proporción de componentes generadores de gas estimada para obtener un árido ligero altamente expandido sería mucho menor de lo que se pensaba: por ejemplo, sólo del 0,06 al 0,2% de carbonatos (calcita o dolomita) o del 0,2 al 1% de Fe₂O₃ estarían realmente implicados en la expansión. Estos resultados sugieren que la obtención de una viscosidad adecuada parece ser mucho más decisiva para la expansión que la capacidad de liberación de gas.

Palabras clave: expansión; arcilla expandida; desprendimiento de gas; árido ligero; porosidad



ELSEVIER

BOLETIN DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE
Cerámica y Vidrio

www.elsevier.es/bsecv



Effect of the addition of organic wastes (cork powder, nut shell, coffee grounds and paper sludge) in clays to obtain expanded lightweight aggregates

Carlos Javier Cobo-Ceacero, José Manuel Moreno-Maroto*, Marta Guerrero-Martínez, Manuel Uceda-Rodríguez, Ana B. López, Carmen Martínez García, Teresa Cotes-Palomino

Department of Chemical, Environmental and Materials Engineering, Higher Polytechnic School of Linares, University of Jaen, Scientific and Technological Campus of Linares, 23700 Linares (Jaén), Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 9 August 2021

Accepted 9 February 2022

Available online 24 February 2022

Keywords:

Lightweight aggregate

Cork

Nut shell

Coffee grounds

Paper waste

Waste recycling

ABSTRACT

Four organic solid wastes (coffee grounds, ground nut shell, paper money sewage sludge and cork powder) have been investigated as bloating inducing agents in lightweight aggregate (LWA) manufacturing when mixed in small proportions (2.5 wt %) with three types of clays. The pellets obtained were fired in a rotary kiln at the maximum feasible temperature for 4 min. A similar impact was observed both in the working conditions and in the properties of the LWAs, showing that the differences between said residues are not as decisive as those of the clays to which they are added. The organic wastes have played a crucial role in achieving reducing conditions inside the aggregate. Thus, their addition has led to substantial improvements both from an operational point of view, lowering the working temperature, and from a technological perspective, favoring bloating and the development of a highly porous and lightweight structure. Leachate studies have shown that the LWAs meet the regulatory limits. The outcomes of this investigation show that, in line with the precepts of the Circular Economy, the recovery of organic wastes of different nature can have a place in the production of environmentally friendly LWAs.

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

* Corresponding author.

E-mail address: jmmaroto@ujaen.es (J.M. Moreno-Maroto).

<https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2022.02.007>

0366-3175/© 2022 The Author(s). Published by Elsevier España, S.L.U. on behalf of SECV. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



Artículo

Efecto de la adición de residuos orgánicos (polvo de corcho, cáscara de frutos secos, posos de café y lodos de papel) en arcillas para obtener áridos ligeros expandidos

Carlos Javier Cobo-Ceacero, José Manuel Moreno-Maroto, Marta Guerrero-Martínez, Manuel Uceda-Rodríguez, Ana B. López, Carmen Martínez-García y Teresa Cotes-Palomino

Tabla 51. Información de la sexta publicación complementaria

Revista	BOLETÍN DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE CERÁMICA Y VIDRIO		
Volumen	Número		Páginas
333	-		18
Recibido	Aceptado		Publicado
9 de agosto de 2021	9 de febrero de 2022		24 de febrero de 2022
DOI	10.1016/j.bsecv.2022.02.007		Veces citado
			3
Indicio de calidad	2021 JOURNAL IMPACT FACTOR (JIF):		3.483
Categoría	Rango JIF	Cuartil JIF	Percentil JIF
Materials Science, Ceramics	6/29	Q1	81,03

Resumen: Se han investigado cuatro residuos sólidos orgánicos (posos de café, cáscara de nuez molida, lodos de depuradora de papel moneda y polvo de corcho) como agentes inductores de la expansión en la fabricación de áridos ligeros (LWA) cuando se mezclan en pequeñas proporciones (2,5 % en peso) con tres tipos de arcillas. Los áridos obtenidos se cocieron en un horno rotatorio a la temperatura máxima factible durante 4 min. Se observó un impacto similar tanto en las condiciones de trabajo como en las propiedades de los LWA, lo que demuestra que las diferencias entre dichos residuos no son tan decisivas como las de las arcillas a las que se añaden. Los residuos orgánicos han jugado un papel crucial en la consecución de condiciones reductoras en el interior del árido. Así, su adición ha supuesto mejoras sustanciales tanto desde un punto de vista operativo, disminuyendo la temperatura de trabajo, como desde una perspectiva tecnológica, favoreciendo la expansión y el desarrollo de una estructura altamente porosa y ligera. Los estudios de lixiviados han demostrado que los LWA cumplen los límites reglamentarios. Los resultados de esta investigación demuestran que, en línea con los preceptos de la Economía Circular, la valorización de residuos orgánicos de diferente naturaleza puede tener cabida en la producción de LWA respetuosos con el medio ambiente.

Palabras clave: residuos de café; corcho; árido ligero; cáscara de nuez; residuos de papel; reciclaje de residuos

ARTICLE IN PRESS

Ceramics International xxx (xxxx) xxx



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Ceramics International

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

Can statistical methods optimize complex multicomponent mixtures for sintering ceramic granular materials? A case of success with synthetic aggregates

José Manuel Moreno-Maroto^{a,d,*}, Carlos Javier Cobo-Ceacero^a, Antonio Conde-Sánchez^b, Ana M. Martínez-Rodríguez^b, Beatriz González-Corrochano^a, Jacinto Alonso-Azcárate^c, Manuel Uceda-Rodríguez^a, Ana B. López^a, Carmen Martínez-García^a, Teresa Cotes-Palomino^a

^a University of Jaén, Department of Chemical, Environmental and Materials Engineering, Higher Polytechnic School of Linares, Scientific and Technological Campus of Linares, 23700, Linares (Jaén), Spain

^b University of Jaén, Department of Statistics and Operations Research, Campus of Las Lagunillas, 23071, Jaén, Spain

^c University of Castilla-La Mancha, Department of Physical Chemistry, Faculty of Environmental Sciences and Biochemistry, Avenida Carlos III, s/n, 45071, Toledo, Spain

^d Spain

^d Department of Geology and Geochemistry, Faculty of Sciences, Autonomous University of Madrid, Cantoblanco, 28049, Madrid, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:
Aggregate
Kaolin
Pyrite
Na₂CO₃
Organic carbon
Design of experiments

ABSTRACT

The relationship between the proportions of multicomponent mixtures with the technological properties of ceramic granular materials (synthetic aggregates) has been studied using statistical methods. The four phases involved in the formulations have been: kaolin (K) as aluminosilicate source; cork powder (C) as organic carbon source; sodium carbonate (N) as flux and pyrite (P) as source of iron and sulfur. The Mixture Experiments - Design of Experiments (ME-DOE) has been the statistical methodology applied from the initial configuration of the 36 starting formulations to the final validation of the models and optimums. After granulation, artificial aggregates have been obtained by sintering in a rotary kiln, and their main technological properties have been determined. Bloating index (BI), particle density (ρ_{ps}), water absorption (WA₂₄) and crushing strength (S) were selected as the four key characteristics to be modeled and optimized, using response surface and effect plots to assess the effect of K, C, N and P on such properties. 32 out of 36 starting varieties met the density criteria for lightweight aggregates. In the optimum formulations obtained, the minimum percentage of K was 83 wt%, so that the variations in the percentages of P, C and N were the critical variables for determining the final properties of the aggregate. The contrast between experimental and estimated data has shown that the models fit adequately, indicating that this type of approach may have enormous potential for future research on artificial aggregates and other ceramic materials.

1. Introduction

The growing human demand for goods makes it increasingly necessary to optimize the resources used in their production. In this way, savings can be made not only economically but also from an environmental perspective, helping to reduce the consumption of natural resources and energy. Such aspects are aligned, for example, with internationally adopted policies on Circular Economy [1,2], the

European Green Deal [3], as well as with several of the Sustainable Development Goals described in the United Nations 2030 Agenda [4].

However, the implementation of new methodologies and raw materials undoubtedly presents the challenge of at least matching the quality and performance of the product obtained with the one it is intended to replace. Thus, the complexity of the processes that occur during manufacturing will increase as the number of variables involved (e.g. number of components) also increases, due to the synergies that

* Corresponding author. University of Jaén. Department of Chemical, Environmental and Materials Engineering, Higher Polytechnic School of Linares, Scientific and Technological Campus of Linares, 23700, Linares (Jaén), Spain.
E-mail addresses: josemanuel.moreno@uam.es (J.M. Moreno-Maroto), cjacob@ujaen.es (C.J. Cobo-Ceacero), aconde@ujaen.es (A. Conde-Sánchez), ammartin@ujaen.es (A.M. Martínez-Rodríguez), bcorroch@ujaen.es (B. González-Corrochano), jacinto.alonso@uclm.es (J. Alonso-Azcárate), muceda@ujaen.es (M. Uceda-Rodríguez), ablopez@ujaen.es (A.B. López), cmartin@ujaen.es (C. Martínez-García), mtcotes@ujaen.es (T. Cotes-Palomino).

<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.220>
Received 7 July 2022; Received in revised form 6 September 2022; Accepted 17 September 2022

Available online 22 September 2022

0272-8842/© 2022 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Please cite this article as: José Manuel Moreno-Maroto, *Ceramics International*, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.220>



Artículo

¿Pueden los métodos estadísticos optimizar las mezclas complejas de multicomponentes para la sinterización de materiales granulares cerámicos? Un caso de éxito con áridos ligeros

José Manuel Moreno-Maroto, Carlos Javier Cobo-Ceacero, Antonio Conde-Sánchez, Ana M. Martínez-Rodríguez, Beatriz González-Corrochano, Jacinto Alonso-Azcárate, Manuel Uceda-Rodríguez, Ana B. López, Carmen Martínez-García y Teresa Cotes-Palomino

Tabla 52. Información de la séptima publicación complementaria

Revista	CERAMICS INTERNATIONAL		
Volumen	Número		Páginas
In Press, Corrected Proof	-		-
Recibido	Aceptado		Publicado
7 de julio de 2022	17 de septiembre de 2022		22 de septiembre de 2022
DOI	10.1016/j.ceramint.2022.09.220		Veces citado
			-
Indicio de calidad	2021 JOURNAL IMPACT FACTOR (JIF):		
	5.532		
Categoría	Rango JIF	Cuartil JIF	Percentil JIF
Materials Science, Ceramics	3/29	Q1	91,38

Resumen: Se ha estudiado mediante métodos estadísticos la relación entre las proporciones de las mezclas multicomponente con las propiedades tecnológicas de los materiales granulares cerámicos (áridos sintéticos). Las cuatro fases implicadas en las formulaciones han sido: caolín (K) como fuente de aluminosilicato; polvo de corcho (C) como fuente de carbono orgánico; carbonato sódico (N) como fundente y piritita (P) como fuente de hierro y azufre. La mezcla Experimentos - Diseño de Experimentos (ME-DOE) ha sido la metodología estadística aplicada desde la configuración inicial de las 36 formulaciones de partida hasta la validación final de los modelos y óptimos. Tras la granulación, se han obtenido áridos artificiales mediante sinterización en horno rotatorio, y se han determinado sus principales propiedades tecnológicas. Se seleccionaron el índice de hinchamiento (BI), la densidad de partículas (ρ_{rd}), la absorción de agua (WA_{24}) y la resistencia al aplastamiento (S) como las cuatro características clave que debían modelizarse y optimizarse. El contraste entre los datos experimentales y los estimados ha demostrado que los modelos se ajustan adecuadamente, lo que indica que este tipo de aproximación puede tener un enorme potencial para futuras investigaciones sobre áridos artificiales y otros materiales cerámicos.

Palabras clave: árido; caolín; piritita; Na_2CO_3 ; carbono orgánico; diseño experimentos

ANEXO F

Patentes

PATENTES

Este Anexo incluye las patentes concedidas que tiene cierta relación y/o pertenecen al área de investigación en el que se desarrolla esta Tesis Doctoral.



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



Número de publicación: **2 804 064**

Número de solicitud: 201930712

Int. Cl.:

C04B 18/24 (2006.01)

C04B 18/26 (2006.01)

C04B 16/02 (2006.01)

SOLICITUD DE PATENTE

A1

<p>Fecha de presentación: 31.07.2019</p> <p>Fecha de publicación de la solicitud: 02.02.2021</p>	<p>Solicitantes: UNIVERSIDAD DE JAÉN (100.0%) Campus Las Lagunillas, s/n 23071 Jaén (Jaén) ES</p> <p>Inventor/es: MARTÍNEZ GARCÍA, Carmen; COTES PALOMINO, María Teresa; MORENO MAROTO, José Manuel; UCEDA RODRÍGUEZ, Manuel y COBO CEACERO, Carlos Javier</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Título: **Procedimiento de obtención de un árido ultraligero y árido así obtenido**

Resumen:

La presente invención se refiere a un árido poroso de muy baja densidad fabricado por sinterización a partir de lodos arcillosos ricos en hierro y residuos de corcho. Al procedimiento de obtención de dicho árido y al uso del mismo en estructuras y piezas de hormigón, mampostería, pavimentos, ingeniería geotécnica, ingeniería civil, humedales artificiales, ingeniería ambiental, horticultura, jardinería y tejados verdes.



FIG. 2

ES 2 804 064 A1



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



Número de publicación: **2 851 383**

Número de solicitud: 202030184

Int. Cl.:

C04B 18/04 (2006.01)

C04B 18/16 (2006.01)

C04B 38/08 (2006.01)

C04B 16/00 (2006.01)

SOLICITUD DE PATENTE

A1

Fecha de presentación:

04.03.2020

Fecha de publicación de la solicitud:

06.09.2021

Solicitantes:

UNIVERSIDAD DE JAÉN (100.0%)

**Campus Las Lagunillas, s/n 23071 Jaén (Jaén)
ES**

Inventor/es:

MARTÍNEZ GARCÍA, Carmen;

COTES PALOMINO, María Teresa;

MORENO MAROTO, José Manuel;

UCEDA RODRÍGUEZ, Manuel y

COBO CEACERO, Carlos Javier

Título: Árido ligero fabricado con residuos ácidos procedentes de la industria del titanio y procedimiento de obtención del mismo

Resumen:

La presente invención se refiere a un árido poroso de baja densidad fabricado por sinterización a partir de lodos minerales de la industria del titanio en combinación con otros residuos. Al procedimiento de obtención de dicho árido y al uso del mismo en estructuras y piezas de hormigón, mampostería, pavimentos, ingeniería geotécnica, ingeniería civil, humedales artificiales, ingeniería ambiental, horticultura, jardinería y tejados verdes.

ES 2 851 383 A1

