



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

Grado en Ingeniería Forestal y del Medio Natural

Estudio de viabilidad del aprovechamiento de la cáscara de pistacho de una plantación ubicada en el término municipal de Perales (Palencia) para su uso como combustible calorífico

ALUMNA: INÉS GÓMEZ DELGADO

TUTORA: MILAGROS CASADO SANZ

COTUTOR: PABLO MARTÍN RAMOS

Junio del 2023

ÍNDICE GENERAL

1. RESUMEN.....	1
2. ANTECEDENTES.....	3
2.1. Situación Actual del Sector del Pistacho.....	4
2.1.1. Superficie dedicada al cultivo del pistacho.....	4
2.1.2. Volumen de compras.....	7
2.2. Residuos Procedentes de la Producción de Pistacho.....	10
2.3. Características de la Cáscara de Pistacho	13
2.4. Residuos de otros cultivos leñosos y otros residuos.....	14
3. OBJETIVOS.....	15
4. CASO DE ESTUDIO	17
4.1. Descripción de la plantación.....	18
5. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS.	20
5.1. Biomasa y combustión	21
5.2. Características de la biomasa para su combustión.....	22
5.2.1. Humedad.....	22
5.2.2. Poder Calorífico.....	23
5.2.3. Volumen de residuo obtenido	24
5.3. Equipos de combustión	27
5.3.1. Equipos de combustión industriales.....	29
5.3.2. Equipos de combustión domésticos.....	32
5.4. Ingeniería del Proceso.....	34
5.4.1. Peletizado.....	34
5.4.2. Trituración	37
5.4.3. Ausencia de Procesado.....	38
6. DETERMINACIÓN DE ALTERNATIVAS	39
6.1. Elección del Tipo de Biomasa.....	40
6.2. Elección del Equipo de Combustión	41
6.2.1. Elección del equipo de combustión a nivel industrial con cogeneración	41
6.2.2. Elección del equipo de combustión a nivel industrial sin cogeneración.....	42
6.2.3. Elección del equipo de combustión doméstico con cogeneración.....	43
6.2.4. Elección del equipo de combustión doméstico sin cogeneración	43
6.3. Elección de la Ingeniería del Proceso.....	44
7. ESTUDIO ECONÓMICO.....	46
7.1. Rendimientos de la plantación de pistacho ubicada en Perales.....	47
7.2. Rendimientos de los consumidores	48

7.2.1. Cáscara de pistacho	48
7.2.2. Cáscara de avellana	50
7.2.3. Cáscara de almendra	51
7.2.4. Hueso de aceituna.....	52
7.2.5. Pellets	53
7.2.6. Resumen del rendimiento de los consumidores.....	54
8. CONCLUSIONES.....	56
9. BIBLIOGRAFÍA.....	58
10. ANEXOS.....	66
A. I. Residuos de otros cultivos leñosos y otros residuos	67
A.I.I. Cáscara de avellana.....	67
A.I.II. Cáscara de castaña	68
A.I.III. Cáscara de almendra	69
A.I.IV. Hueso de aceituna	71
A.I.V. Pellets.....	72
A. II. Análisis de Laboratorio.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de la superficie destinada a la producción de pistacho en secano o regadío en el año 2022 en España. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de MAPA,2023	5
Tabla 2. Datos de volumen y valor de compras, consumo y gasto per cápita y precio medio de los frutos secos en el año 2021 en España. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de MAPA, 2023	7
Tabla 3. Exportaciones de pistacho en el año 2021 en España expresadas en t y en forma de porcentaje respecto al total de exportaciones. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de MAPA, 2023	9
Tabla 4. Exportaciones de pistacho en el año 2022 en España expresadas en t y en forma de porcentaje respecto al total de exportaciones. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de MAPA, 2023	9
Tabla 5. Proporciones de cada elemento constituyente de la cáscara de pistacho. Fuente: Ballesteros et al, 2017	13
Tabla 6. Componentes que constituyen la cáscara de pistacho. Fuente: Ballesteros et al, 2017	13
Tabla 7. Composición de la cáscara de pistacho de la variedad "Kerman" de la plantación del municipio de Perales. Fuente: Resultados propios, en base a análisis realizado en ITAGRA.CT ...	14
Tabla 8. Contenido de humedad de los diferentes tipos de biomasa. Fuente: Elaboración propia a partir de fuentes referidas en el A. I y datos experimentales para pistacho.....	23
Tabla 9. Poder calorífico de los diferentes tipos de biomasa. Fuente: Elaboración propia a partir de fuentes referidas en el A. I y datos experimentales para pistacho.....	23
Tabla 10. Rendimientos de la producción de pistacho dependiendo del calibre. Fuente: Elaboración propia a partir de datos facilitados por la procesadora "Agroforestales Esla" (Villalpando)	26
Tabla 11. Rendimientos de la plantación del municipio de Perales. Fuente: Elaboración propia a partir de datos facilitados por la procesadora "Agroforestales Esla" (Villalpando)	27
Tabla 12. Volumen de residuo obtenido de los diferentes tipos de biomasa. Fuente: Elaboración propia a partir de fuentes referidas en el A. I	27
Tabla 13. Tabla comparativa de las características de cada tipo de biomasa. Fuente: Elaboración propia a partir de fuentes referidas en el A. I y datos experimentales para pistacho	40
Tabla 14. Equipos de combustión industriales con cogeneración. Fuente: Elaboración propia	41
Tabla 15. Equipos de combustión industriales sin cogeneración. Fuente: Elaboración propia	42
Tabla 16. Equipos de combustión domésticos con cogeneración. Fuente: Elaboración propia	43
Tabla 17. Características principales de las calderas domésticas policombustible existentes en el mercado. Fuente: Elaboración propia	44
Tabla 18. Análisis comparativo de las posibles alternativas del procesado de la cáscara de pistacho para su incorporación como combustible. Fuente: Elaboración propia.....	45
Tabla 19. Necesidades de quemado de los equipos de combustión dependiendo de su potencia. Fuente: Elaboración propia	49
Tabla 20. Cantidad de cáscara de pistacho necesaria por hora para la alimentación de los diferentes equipos de combustión. Fuente: Elaboración propia.....	49
Tabla 21. Coste de alimentación de los equipos de combustión por hora empleando cáscara de pistacho. Fuente: Elaboración propia.....	50

Tabla 22. Cantidad de cáscara de avellana necesaria por hora para la alimentación de los diferentes equipos de combustión. Fuente: Elaboración propia.....	51
Tabla 23. Cantidad de cáscara de almendra necesaria por hora para la alimentación de los diferentes equipos de combustión. Fuente: Elaboración propia.....	51
Tabla 24. Coste de alimentación de los equipos de combustión por hora empleando cáscara de almendra. Fuente: Elaboración propia	52
Tabla 25. Cantidad de hueso de aceituna necesaria por hora para la alimentación de los diferentes equipos de combustión. Fuente: Elaboración propia.....	52
Tabla 26. Coste de alimentación de los equipos de combustión por hora empleando hueso de aceituna. Fuente: Elaboración propia.....	53
Tabla 27. Cantidad de pellets necesaria por hora para la alimentación de los diferentes equipos de combustión. Fuente: Elaboración propia.....	53
Tabla 28. Coste de alimentación de los equipos de combustión empleando pellets. Fuente: Elaboración propia.....	54
Tabla 29. Análisis comparativo económico de las diferentes alternativas de biomasa para alimentar los diferentes equipos de combustión. Fuente: Elaboración propia.....	54
Tabla A.I. I. Rendimientos del procesado de la avellana y separación del fruto y la cáscara. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos de Finlay,1988	67
Tabla A.I.II. Componentes que constituyen la cáscara de avellana. Fuente: Ballesteros et al, 2017	68
Tabla A.I. III. Análisis de la cáscara de avellana. Fuente: Ballesteros et al, 2017	68
Tabla A.I. IV. Análisis inmediato de la cáscara de almendra triturada. Fuente: Ballesteros et al, 2017	71
Tabla A.I.V. Análisis elemental de la cáscara de almendra triturada. Fuente: Ballesteros et al, 2017	71
Tabla A.I. VI.. Composición química de la madera. Fuente: Ballesteros et al, 2017	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de explotaciones de frutos secos por Comunidades Autónomas en España en el año 2022. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de MAPA, 2023	4
Figura 2. Distribución de la superficie destinada al cultivo de pistacho por Comunidades Autónomas en España en el año 2022. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de MAPA,2023	5
Figura 3. Número de explotaciones de frutos secos por Comunidades Autónomas en España que perciben o no ayudas en el año 2022. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de MAPA, 2023	6
Figura 4. Evolución mensual del total de compras y precio medio de los frutos secos desde diciembre de 2019 hasta diciembre de 2021 en España. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de MAPA, 2023	7
Figura 5. Volumen de compra de los diferentes tipos de frutos secos en miles de kg desde el año 2008 hasta el año 2021. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de MAPA, 2023	8
Figura 6. Exportaciones e importaciones del pistacho por países en el año 2020. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de MAPA, 2023	10
Figura 7. Partes del fruto del pistacho. Fuente: Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León	11
Figura 8. Fases del procesado del pistacho. Fuente: Elaboración propia.....	12
Figura 9. Localización de la plantación en la Comunidad Autónoma de Castilla y León. Escala: 1:150.000. Fuente: Pinterest	18
Figura 10. Localización de la plantación en la provincia de Palencia. Escala: 1:120.000. Fuente: Wikipedia.....	18
Figura 11. Localización de la finca en la localidad de Villaldeván en el municipio de Perales. Escala: 1:20.000. Fuente: SIGPAC.....	19
Figura 12. División de la finca en las parcelas desde la 5038 hasta la 5042. Escala: 1:5.000. Fuente: SIGPAC.....	19
Figura 13. Rendimientos de la producción de las variedades de pistacho de calibre grande. Fuente: Elaboración propia a partir de datos facilitados por la procesadora "Agroforestales Esla" (Villalpando)	25
Figura 14. Rendimientos de la producción de las variedades de pistacho de calibre pequeño. Fuente: Elaboración propia a partir de datos facilitados por la procesadora "Agroforestales Esla" (Villalpando)	26
Figura 15. Funcionamiento de una caldera con cogeneración. Fuente: SUGIMAT S.L.	30
Figura 16. Funcionamiento de la microcogeneración. Fuente: OCU, 2023	33
Figura 17. Secadero del tipo tromel. Fuente: Rodríguez, 2016	35
Figura 18. Proceso del peletizado de la biomasa. Fuente: Elaboración propia a partir de información incluida en Rodríguez, J. (2019)	36

1.RESUMEN.

El pistacho es un fruto seco procedente del cultivo de los árboles de la especie *Pistacia vera* que posee una capa denominada endocarpio o cáscara, siendo considerada el residuo de la producción de esta especie. El objetivo de este estudio de viabilidad ha sido valorar la posibilidad de emplear este residuo procedente de una plantación ubicada en el municipio de Perales como combustible calorífico para la alimentación de calderas domésticas o industriales, entre otros equipos de combustión. Para ello, se ha determinado el poder calorífico de esta cáscara de pistacho mediante el análisis de la misma, así como su humedad y el porcentaje de residuo obtenido con respecto a la producción. Todos estos datos han sido comparados con los de otras alternativas de biomasa procedentes de la producción de otros cultivos leñosos para el estudio de su rentabilidad, además de llevar a cabo una valoración económica empleando precios actualizados por kilogramo de biomasa de cada posible combustible. Adicionalmente, se han evaluado diferentes equipos de combustión que podrían alimentarse empleando este residuo distinguiendo entre domésticos e industriales y entre los que experimentan un proceso de cogeneración o no. La conclusión obtenida de este estudio es que la cáscara de pistacho y en especial, la obtenida en la plantación objeto, es una alternativa rentable para ser empleada como combustible de cualquier equipo de combustión debido a su elevado poder calorífico y a su precio reducido en comparación a otras alternativas como los pellets. Sin embargo, debería de experimentar un triturado previo mediante un molino de martillos para evitar posibles atascos en los equipos de combustión.

2.ANTECEDENTES.

2.1. Situación Actual del Sector del Pistacho

El pistacho (*Pistacia vera*) perteneciente a la familia *Anacardiaceae* se trata de un árbol de tamaño pequeño cuya maduración y crecimiento es lento.

Sus hojas caducas son grandes, ovaladas y compuestas de tres o más folíolos y se trata de un árbol dioico, es decir, para que tenga lugar la polinización necesita de un individuo femenino y otro masculino.

Comienza a ser productivo a partir de su tercer año de vida habiendo sido previamente injertado de forma adecuada, pero no es hasta el séptimo año cuando su producción comienza a ser realmente beneficiosa.

Dado que el estudio que se está llevando a cabo se encuentra referido a una plantación ubicada en el término municipal de Perales en Palencia, a pesar de las diversas variedades que existen de este cultivo leñoso, únicamente nos vamos a centrar en la variedad que existe en esta plantación que es la variedad “Kerman”.

El pistacho “Kerman” se trata de una variedad de pistacho hembra procedente de Irán de un vigor intermedio, con una alta producción y una gran adaptabilidad.

Su floración transcurre entre finales de marzo y mediados de abril y su polinización tiene lugar de forma aérea siendo el polinizador la variedad macho “Peter” en el caso de esta explotación.

La situación actual del pistacho en España se va a detallar a continuación teniendo en cuenta una serie de datos obtenidos de (MAPA, 2023) como la superficie dedicada a este cultivo, el volumen de compras del mismo y las importaciones y exportaciones de este producto.

2.1.1. Superficie dedicada al cultivo del pistacho

Los frutos secos son un cultivo muy presente en España existiendo 28.909 explotaciones destinadas a su producción. La distribución de la producción de cultivo de frutos secos por Comunidades Autónomas en España se encuentra representada en la Figura 1.

Según la siguiente figura, las Comunidades Autónomas que destacan por la producción de frutos secos son Andalucía, Castilla la Mancha, Comunidad Valenciana y Murcia debido a sus necesidades climáticas de temperaturas templadas y cálidas, pero sin existencia de heladas. Las autonomías españolas que no aparecen en la Figura 1 representan un porcentaje tan pequeño que resultan despreciables.

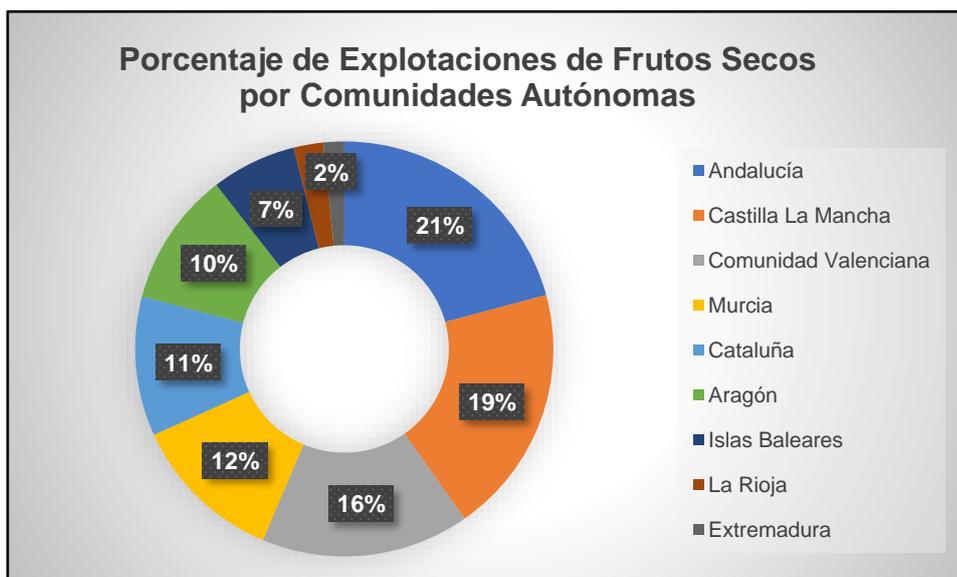


Figura 1. Porcentaje de explotaciones de frutos secos por Comunidades Autónomas en España en el año 2022. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de MAPA, 2023.

El pistacho es un fruto seco que se puede cultivar en secano o en regadío. La distribución de la superficie destinada a la producción de este cultivo de una forma o de otra en España se encuentra detallada en la Tabla 1.

Tabla 1. Distribución de la superficie destinada a la producción de pistacho en secano o regadío en el año 2022 en España. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de MAPA,2023.

AÑO 2022	SECANO	REGADÍO	INVERNADERO	TOTAL
Pistacho (ha)	41.271	25.196	0	66.466
Frutales No Cítricos (ha)	856.796	417.749	10.877	1.285.421
% FNC	4,82	6,03	0	5,17
Superficie Geográfica (ha)	46.768.952	3.752.163	76.600	50.597.715
% SG	0,09	0,67	0	0,13

Como se puede observar en la Tabla 1, el pistacho se cultiva prácticamente en el doble de superficie en secano que, en regadío, no existiendo posibilidades de su cultivo en invernadero. La superficie destinada al cultivo de pistacho tanto en secano como en regadío supone un 5% dentro de la superficie cultivada por frutales no cítricos y un 0,13%, es decir, una cifra casi despreciable dentro del total de la superficie geográfica en España incluyendo áreas forestales, eriales y pastizales entre otros.

La distribución de superficie destinada al cultivo del pistacho en secano y regadío por Comunidades Autónomas en España se recoge en la Figura 2.

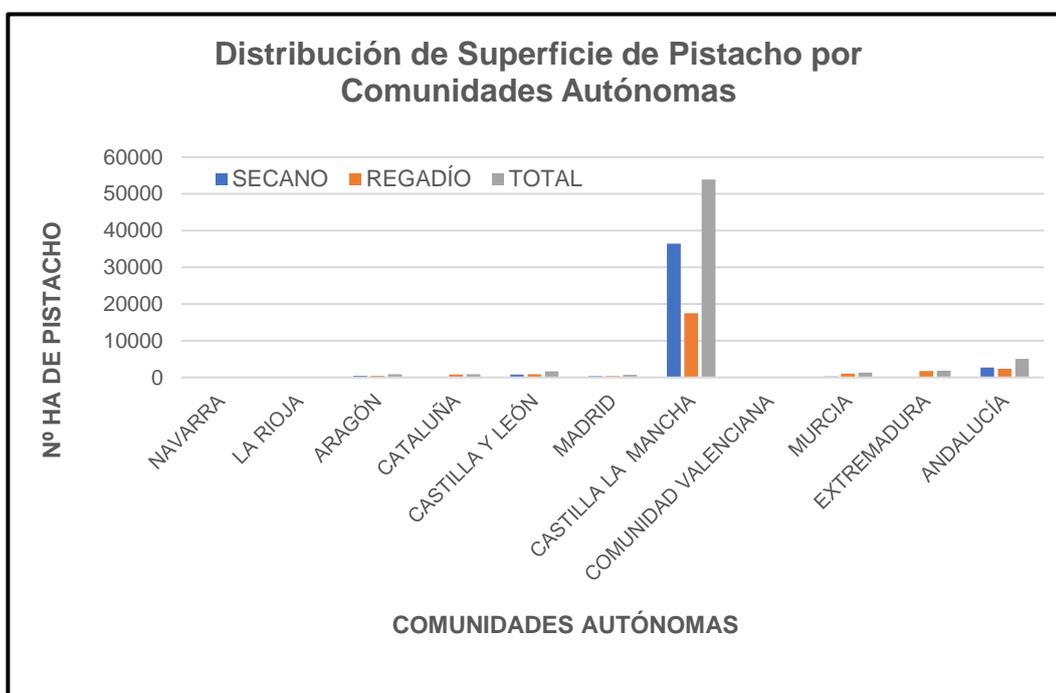


Figura 2. Distribución de la superficie destinada al cultivo de pistacho por Comunidades Autónomas en España en el año 2022. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de MAPA,2023.

En la Figura 2, se aprecia como la principal Comunidad Autónoma destinada a la producción de pistacho en España es Castilla la Mancha seguida de Andalucía y Extremadura. Esto se debe a las condiciones climáticas de estas zonas dado que son las más adecuadas para el cultivo de este fruto seco teniendo en cuenta que este cultivo necesita de inviernos fríos y húmedos y veranos secos y calurosos, pero evitando las heladas.

Sin embargo, tanto en el resto de autonomías presentes en la Figura 2 como en el caso de las que ni siquiera aparecen no existe ningún tipo de cultivo de este fruto seco o una cifra tan pequeña que no se tiene en cuenta. Uno de los aspectos a tener en cuenta para la implantación de un cultivo, es si por su producción se puede obtener alguna ayuda. El 79,12% de las explotaciones de frutos secos reciben alguna de las ayudas PAC.

En la Figura 3 se encuentra representado el número de explotaciones de frutos secos que perciben o no ayudas.

Según se muestra en la siguiente figura, las Comunidades Autónomas que destacan porque en ellas existe un mayor número de explotaciones que perciben ayudas son Andalucía, Comunidad Valenciana, Murcia y Castilla y León. Las tres primeras no sorprenden dado que poseen un gran porcentaje de su superficie destinada a este cultivo. Sin embargo, Castilla y León impresiona dado que no es una de las principales autonomías destinadas a este cultivo.

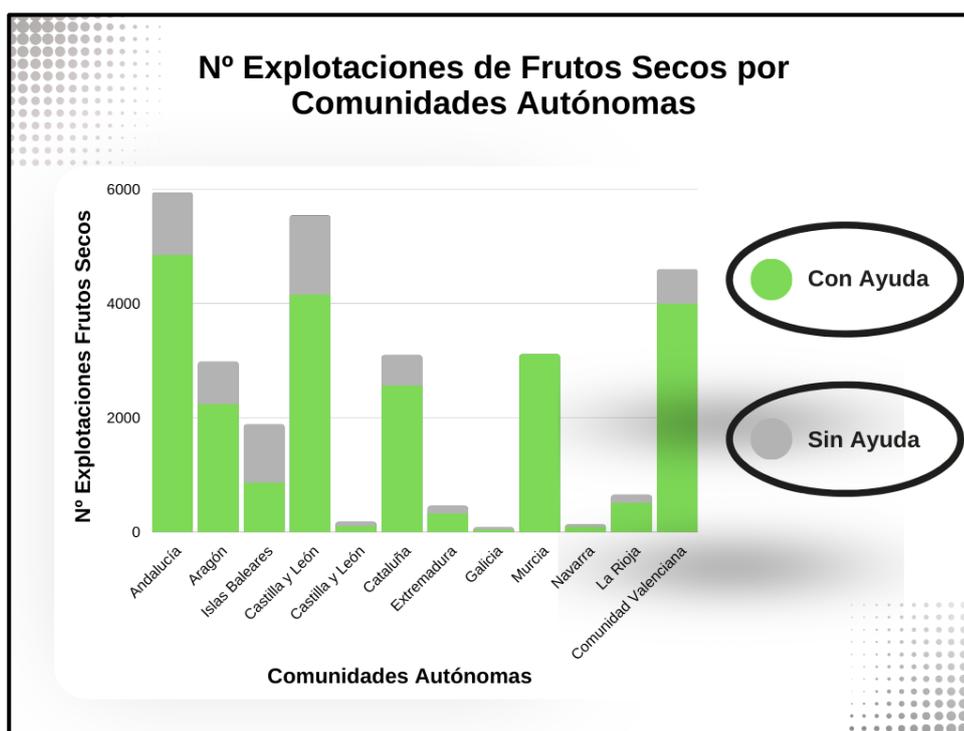


Figura 3. Número de explotaciones de frutos secos por Comunidades Autónomas en España que perciben o no ayudas en el año 2022. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de MAPA, 2023.

Además, hay que tener en cuenta que la edad media de los productores de frutos secos en España ronda los 63 años y en el caso de Castilla y León los 64 años. Esto quiere decir que los productores se encuentran al borde de la jubilación por lo que es complicado que haya un relevo generacional para los agricultores que se dedican a estos cultivos.

2.1.2. Volumen de compras

Los principales valores del año 2021 respecto al volumen de compras y al consumo en cuanto a los frutos secos se recogen en la Tabla 2. Además, en esta tabla se puede observar una comparativa con los valores que existían en el año 2020.

Tabla 2. Datos de volumen y valor de compras, consumo y gasto per cápita y precio medio de los frutos secos en el año 2021 en España. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de MAPA, 2023.

	Consumo doméstico de frutos secos	% Variación 2021 vs. 2020
Volumen compras (miles kg)	164.520,43	-6,70%
Valor compras (miles €)	1.263.491,40	-3,90%
Consumo per cápita (kg)	3,55	-6,80%
Gasto per cápita (€)	27,29	-4,10%
Precio medio (€/kg)	7,68	+2,90%

Como se puede observar en tabla anterior, todos los valores han disminuido entre un 4% y un 7% del año 2020 al año 2021.

El volumen total de compras de frutos secos en el año 2021 es de 164.520 miles de kg que se traducen en 1.263.491 miles de euros, dado que el precio medio de los frutos secos es bastante elevado, en concreto 7,68 €/kg, en comparación a otros cultivos como el cereal cuyo precio medio rondaría entre los 0,15 €/kg y los 0,25 €/kg. Además, este precio medio de los frutos secos ha aumentado con respecto al año anterior.

El consumo per cápita y el gasto per cápita se han visto reducidos entre el año 2020 y el año 2021 probablemente debido a una reducción de los ingresos de los consumidores.

En la Figura 4 se ve representada la evolución mensual del total de compras de los frutos secos desde diciembre de 2019 hasta diciembre de 2021 al mismo tiempo que la variación de su precio medio.

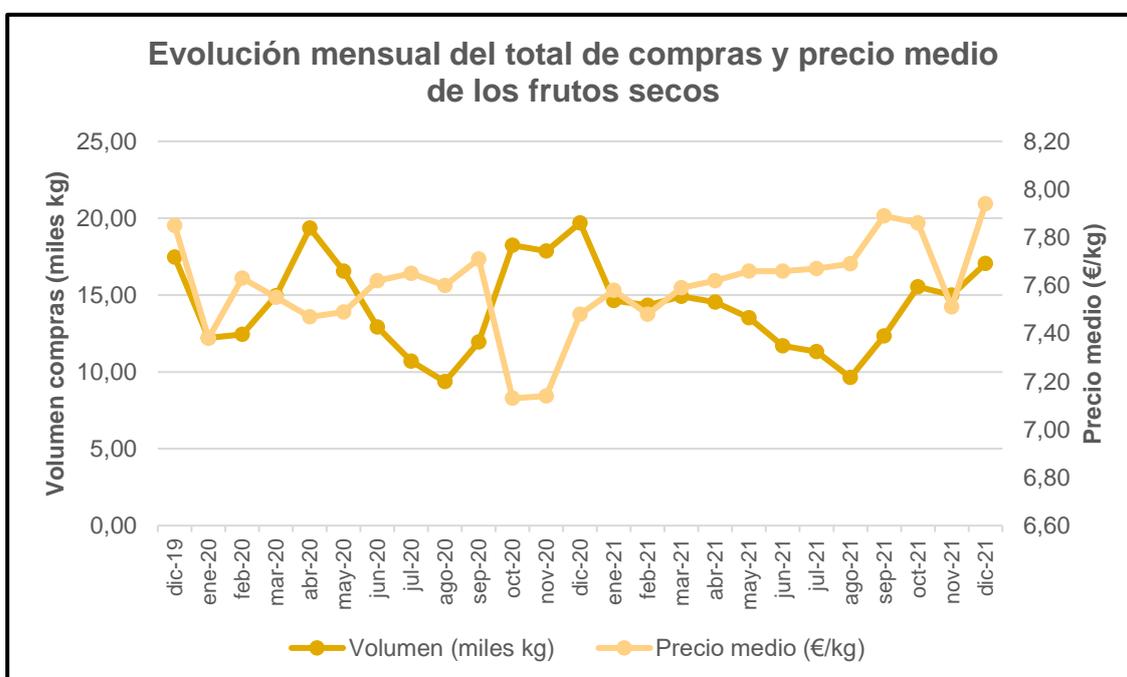


Figura 4. Evolución mensual del total de compras y precio medio de los frutos secos desde diciembre de 2019 hasta diciembre de 2021 en España. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de MAPA, 2023.

En la figura anterior, se observa como existe una evolución inversa entre el volumen de compras de los frutos secos en España y el precio medio, dado que cuando el volumen alcanza un valor máximo coincide con un valor mínimo del precio medio de este producto.

Para entrar más en detalle y poder analizar con una mayor profundidad, en la Figura 5 se encuentra representado el volumen de compra de frutos secos por tipos donde se observa que en general existe un aumento en el volumen de compra de los frutos secos en los aproximadamente últimos diez años. En esta figura, se puede apreciar que tanto las nueces como las avellanas son los frutos secos que presentan un mayor volumen de compra con respecto al resto. Además, la mitad del volumen de compra del total de frutos secos se corresponde al grupo de otros frutos secos entre los que se encuentra el pistacho.

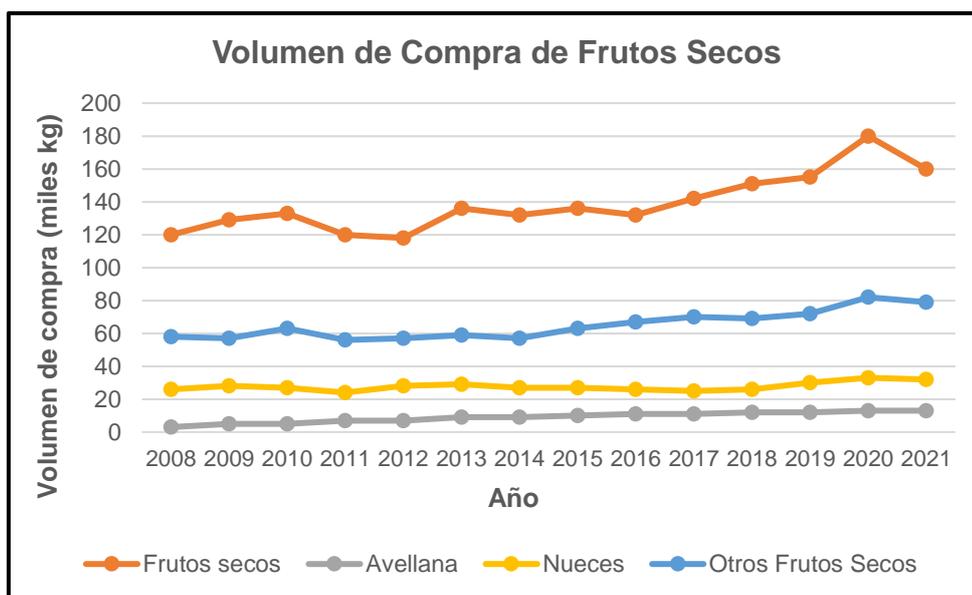


Figura 5. Volumen de compra de los diferentes tipos de frutos secos en miles de kg desde el año 2008 hasta el año 2021. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de MAPA, 2023.

Las exportaciones de otras frutas y frutos entre los que se encuentra el pistacho en los años 2021 y 2022 se encuentran expresadas en t y porcentualmente respecto al total de exportaciones en la Tabla 3 y Tabla 4.

Como se puede apreciar en las siguientes tablas, existe un ascenso progresivo de la cantidad de t exportadas de estos productos a medida que avanzan los meses del año probablemente debido a que la época de cosecha de estos frutos se concentra en otoño entre los meses de septiembre y octubre.

Por otra parte, si comparamos las t exportadas de estos productos en el año 2021 con las del año 2022 prácticamente son similares.

También cabe destacar que aproximadamente el porcentaje de exportaciones de los otros frutos respecto al total de las mismas supone entre un 3% y un 4%.

Tabla 3. Exportaciones de pistacho en el año 2021 en España expresadas en t y en forma de porcentaje respecto al total de exportaciones. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de MAPA, 2023.

MES DEL AÑO 2022	t	% RESPECTO AL TOTAL DE EXPOTACIONES
ENERO	10.446	4,4
FEBRERO	7.913	3,1
MARZO	5.372	2,3
ABRIL	5.798	2,6
MAYO	7.169	3,4
TOTAL	36.698	3,16

Tabla 4. Exportaciones de pistacho en el año 2022 en España expresadas en t y en forma de porcentaje respecto al total de exportaciones. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de MAPA, 2023.

MES DEL AÑO 2021	t	% RESPECTO AL TOTAL DE EXPOTACIONES
ENERO	8.478	4,5
FEBRERO	5.848	3
MARZO	6.959	1,9
ABRIL	7.904	3,4
MAYO	8.036	3,8
JUNIO	7.295	3,1
JULIO	8.254	3,31
AGOSTO	10.105	3,27
SEPTIEMBRE	11.510	3,26
OCTUBRE	14.273	4,6
NOVIEMBRE	16.444	4,55
DICIEMBRE	15.589	4,24
TOTAL	120.695	3,58

En la Figura 6 se observan las exportaciones e importaciones del pistacho por países en el año 2020. Como se puede apreciar, los grandes exportadores de pistacho son Estados Unidos seguidos de Irán y China. En el caso de las importaciones, se invierte el orden encontrándose en el primer puesto China seguida de Irán y Estados Unidos.

Además, España no destaca por ser uno de los principales exportadores o importadores de pistacho en el mundo.

Otro aspecto a tener en cuenta es que las principales exportaciones de pistacho de España se realizan a Portugal, que tiene necesidades de este producto sin haber experimentado el procesado para ahorrar costes de los intermediarios.

Además, según (IRNA, 2022), “España es uno de los mayores importadores del pistacho iraní a lo largo de los primeros cuatro meses del año 2022”.

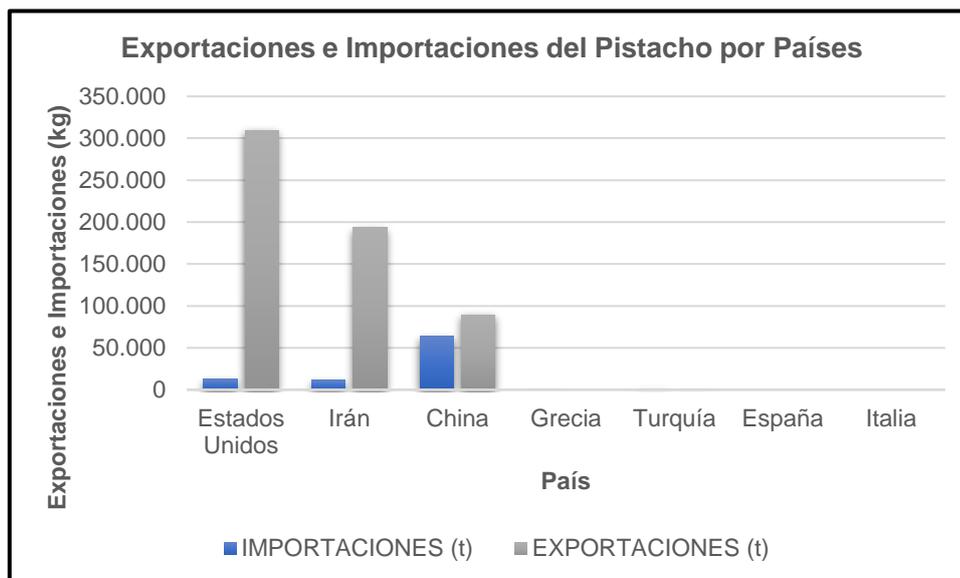


Figura 6. Exportaciones e importaciones del pistacho por países en el año 2020.
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de MAPA, 2023.

En conclusión a todos estos datos, el consumo de frutos secos en España y en particular del pistacho es creciente con una evaluación constante y positiva. Esto se debe a las propiedades beneficiosas alimenticias que poseen estos productos. En el caso del pistacho, se sabe que tiene la capacidad de reducir el colesterol LDL al mismo tiempo que de aumentar el colesterol HDL. También aporta antioxidantes como vitaminas A y E y la vitamina B6 que se encarga de mejorar la producción de hemoglobina en nuestra sangre además de ayudar a prevenir la diabetes tipo 2.

2.2. Residuos Procedentes de la Producción de Pistacho

El pistacho es un fruto seco con cáscara que alcanza su maduración entre los meses de septiembre y octubre dependiendo de las condiciones climáticas del lugar.

Este fruto, como se puede observar en la Figura 7, posee un epicarpio o pellejo además de un endocarpio o cáscara y finalmente la semilla, que es la parte comestible, protegida por una cubierta y compuesta por el embrión y dos cotiledones.

A medida que va madurando el fruto, el epicarpio va cambiando de color progresivamente de verde a marfil y de éste a rosa.

Cuando se ha alcanzado el punto de madurez óptimo, la envoltura externa se separa fácilmente de la cáscara del pistacho. Además, en su interior se va reduciendo la respiración, el contenido de proteínas y la humedad aumentando al mismo tiempo el contenido en azúcares y grasa.

Externamente, se produce también una escisión entre el pedúnculo y el fruto para que con un ligero movimiento se puedan desprender los frutos ya maduros fácilmente del árbol.

Una vez que el fruto ha alcanzado su maduración, se procede a su recogida que en el caso de la variedad "Kerman" suele tener lugar en torno a mediados de octubre. Una recogida tardía tiene efectos negativos como la pérdida de cosecha o el ataque de hongos y parásitos.

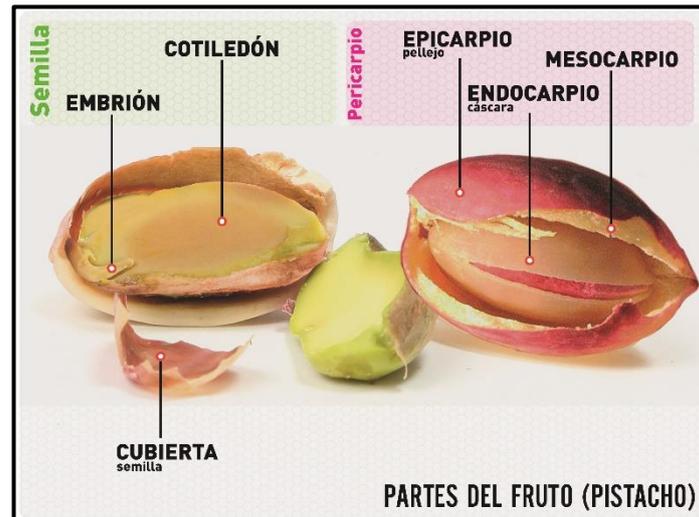


Figura 7. Partes del fruto del pistacho. Fuente: Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León.

Es recomendable llevar a cabo la recolección de una sola pasada y atendiendo a las precipitaciones de la zona, dado que, octubre es un mes susceptible de días con lluvia y una recogida en estas condiciones aumenta las posibilidades de contaminación por hongos. La presencia de hongos supone un aumento de la cantidad de aflatoxinas en los frutos que son toxinas producidas por hongos en frutos de cáscara que resultan ser tóxicas para el consumo humano.

La recogida puede llevarse a cabo de forma manual o mecanizada. En el caso particular de la plantación objeto de este estudio, se lleva a cabo de forma mecanizada empleando paraguas vibradores. Es importante conocer que los pistachos que permanecen en el árbol tras el vibrado se encuentran vacíos. La cosecha se va almacenando en la tolva del paraguas y en el momento en que es llenada, se procede a ser descargada en un remolque hasta que se llene y poder transportarlo a la procesadora.

La procesadora a la que se destina la cosecha de esta plantación se denomina “Agroforestales Esla” y se encuentra situada en el municipio de Villalpando en la provincia de Zamora.

Una vez que la cosecha llega a la procesadora, se procede a su preparación experimentando primeramente un proceso de separación de las hojas a través de una aspiradora y de las ramas y ramilletes con unos rodillos.

Posteriormente, tiene lugar un pelado del pistacho eliminando la vaina carnosa o epicarpio que lo recubre mediante un proceso de fricción. El pistacho ya pelado se dirige a un tanque de flotación y experimenta un proceso de separación distinguiendo entre los que son aprovechables y los no válidos.

Más adelante, tiene lugar el secado de la cosecha y se van realizando muestras de humedad hasta que el producto alcanza entre un 6 y un 7% de humedad. El pistacho recién recogido presenta inicialmente de forma aproximada un 50% de humedad.

Una vez secados, se dirigen a la aventadora que es una máquina encargada de diferenciar los pistachos vacíos de los llenos. Los pistachos llenos son separados por un tremer que es una máquina encargada de separar los pistachos abiertos de los cerrados. Los abiertos serán después clasificados dependiendo el calibre de los mismos y los cerrados se abrirán en la rompedora y seguirán el camino de los abiertos.

Finalmente, la cosecha atraviesa unas cámaras infrarrojas cuyo objetivo es la eliminación de los manchados obteniendo los pistachos sin epicarpio y secados listos para consumir o realizar los tratamientos oportunos como el salado o tostado dependiendo de su destino.

Las fases del procesado completo del pistacho se encuentran representadas en la Figura 8.



Figura 8. Fases del procesado del pistacho. Fuente: Elaboración propia.

La forma de hallar los distintos calibres es pesando el número de pistachos que entran en una onza, de tal manera, que, si en una onza entran entre 18 y 20 pistachos, esta partida se corresponde con un calibre de 18-20. Los diferentes calibres que hay son:

- Calibre 18-20 = entran entre 18 y 20 pistachos en una onza.
- Calibre 20-22 = entran entre 20 y 22 pistachos en una onza.
- Calibre 23-25 = entran entre 23 y 25 pistachos en una onza.
- Calibre >25 = entran más de 25 pistachos en una onza.

De esta forma, las partidas correspondientes a un calibre 18-20 y a un calibre 20-22 presentan frutos de calibre pequeño y las correspondientes a los calibres 23-25 y >25 poseen frutos de calibre grande.

En conclusión, los residuos procedentes del procesado del pistacho son tanto el epicarpio como el endocarpio. Para el epicarpio, se está valorando la opción de ser empleado en la elaboración de colonias y perfumes, pero actualmente es eliminado y tratado como un residuo natural.

Sin embargo, el endocarpio, es decir, la cáscara del pistacho, podría tener diversos aprovechamientos para que tenga lugar su reutilización. A lo largo de este estudio, se detallarán las posibilidades de emplear este residuo como combustible calorífico aunque también existen otras formas de que la cáscara pueda ser reciclada como pueden ser: utilizarla como mantillo orgánico para aumentar la fertilidad del suelo, mantener la humedad o eliminar las malas hierbas; evitar el acercamiento de plagas como caracoles o babosas en plantas domésticas; para fines decorativos; e incluso se está estudiando la posibilidad de extraer de ella compuestos fenólicos para la obtención de energía mediante gasificación.

Por tanto, el residuo interesante para este estudio, es decir, para ser empleado como combustible calorífico, es el endocarpio, la cáscara de pistacho.

2.3. Características de la Cáscara de Pistacho

La cáscara de pistacho es el endocarpio de este fruto seco que se define como la capa interna que envuelve a la semilla endurecida o lignificada.

El endocarpio está constituido por diversos elementos que son principalmente el carbono (C) y el oxígeno (O) pudiendo estar presentes el sodio (Na), el cloro (Cl) y el potasio (K) formando parte de la sal agregada, pero, en el caso de las cáscaras lavadas, estos elementos no forman parte de las mismas.

Según (Ballesteros et al, 2017), las proporciones de cada elemento que constituye la cáscara de pistacho se encuentran recogidas en la Tabla 5.

Tabla 5. Proporciones de cada elemento constituyente de la cáscara de pistacho. Fuente: Ballesteros et al, 2017.

CÁSCARA DEL PISTACHO		
Elementos	Carbono (C)	Oxígeno (O)
Proporción	70,40%	29,60%

Además, en este estudio se ha llevado a cabo un análisis térmico diferencial (DTA) y un análisis termogravimétrico (TGA) del residuo en el que se ha llegado a la conclusión de que está formado por los componentes expresados en la Tabla 6.

Tabla 6. Componentes que constituyen la cáscara de pistacho. Fuente: Ballesteros et al, 2017.

CÁSCARA DEL PISTACHO				
Componentes	Humedad (H)	Hemicelulosa	Celulosa +Lignina	Material inorgánico (Cenizas)
Proporción	4,40%	55,70%	38,10%	1,8%

El comportamiento térmico de estos componentes se encuentra relacionado con la estructura que posea. De este modo:

- La hemicelulosa posee una estructura polimérica con cadenas cortas laterales lo que provoca que sea la de más fácil combustión.
- La celulosa presenta cadenas asociadas unas con otras lo que provoca que la combustión tenga lugar a unas mayores temperaturas.
- La lignina posee una estructura más cerrada de polímeros aromáticos que se caracteriza por ser un material más fuerte y, por tanto, resistente a la temperatura.

Por tanto, observando las proporciones de cada componente y su comportamiento frente a la temperatura, la mayor parte de este residuo es capaz de entrar fácilmente en combustión y el resto necesita de unas mayores temperaturas, existiendo así un equilibrio entre una parte que requiere bajas temperaturas y otra que requiere mayores condiciones térmicas.

Para conocer el porcentaje de cada componente que conforma la cáscara procedente de la plantación objeto de estudio perteneciente a la variedad de fruto de calibre grande "Kerman" se ha elaborado un análisis en los Laboratorios del Centro Tecnológico Agrario y Alimentario tal y como se muestra en el A. II. Los resultados se encuentran recogidos en la Tabla 7. Los porcentajes de cenizas, materia orgánica y carbono total se encuentran expresados sobre la materia seca.

Tabla 7. Composición de la cáscara de pistacho de la variedad "Kerman" de la plantación del municipio de Perales. Fuente: Resultados propios, en base a análisis realizado en ITAGRA.CT.

CÁSCARA DE PISTACHO VARIEDAD "KERMAN"			
HUMEDAD (%)	CENIZAS (%)	MATERIA ORGÁNICA (%)	CARBONO TOTAL (%)
7,62	1,61	98,39	57,20

2.4. Residuos de otros cultivos leñosos y otros residuos

Los residuos de biomasa se definen como materiales orgánicos generados en las actividades agrícolas, silvícolas y ganaderas, que pueden ser utilizados como una fuente de energía, es decir, como combustibles.

Los residuos de biomasa más comunes que nos podemos encontrar en España procedentes de otros cultivos leñosos además del pistacho son: cáscara de avellana, cáscara de castaña, cáscara de almendra y hueso de aceituna.

Además, resulta interesante conocer las características de los pellets para poder llevar a cabo una comparativa con el resto de residuos de biomasa y dado su aumento en el precio, poder encontrar una alternativa más económica mediante el aprovechamiento de la cáscara de pistacho con el fin de incrementar la sostenibilidad y los ingresos a los productores de este cultivo.

Las características de los tipos de biomasa mencionados anteriormente y tenidos en cuenta en este estudio de viabilidad se encuentran explicadas de forma detallada en el A. I.

3.OBJETIVOS.

El pistacho es un fruto seco cuya producción se encuentra en constante aumento en España debido a que su rentabilidad actualmente es elevada por el incremento de su consumo entre otros frutos secos y a su precio tan prominente. Sin embargo, una parte de la producción se corresponde con un residuo, la cáscara de este fruto seco, de la cual no se puede obtener ningún beneficio económico por parte de los productores además de que puede provocar un importante impacto ambiental aumentando la contaminación y degradación del ecosistema.

El objetivo de este estudio es evaluar la viabilidad que tendría el aprovechamiento de la cáscara de pistacho y, en concreto la obtenida en una explotación ubicada en el término municipal de Perales en Palencia, como biomasa para obtener energía calorífica. Se trata de aportar una utilidad al residuo de la cáscara con el fin de fomentar la sostenibilidad. Además, se aumentará el abanico de opciones de los diferentes tipos de biomasa existentes pudiendo suponer una solución al aumento de los precios de otras materias primas.

Este objetivo responde a las competencias contempladas en la orden CIN/324/2009, de 9 de febrero, por la que se establecen los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Forestal.

En el "Apartado 3. Objetivos. - Competencias que los estudiantes deben adquirir" se citan entre otras las siguientes competencias afines a la temática objeto del presente Trabajo Fin de Grado (TFG):

- *Capacidad para medir, inventariar y evaluar los recursos forestales, aplicar y desarrollar las técnicas silvícolas y de manejo de todo tipo de sistemas forestales, parques y áreas recreativas, así como las técnicas de aprovechamiento de productos forestales maderables y no maderables.* En el presente TFG, para el caso del residuo del pistacho que sería la cáscara.
- *Capacidad para caracterizar las propiedades anatómicas y tecnológicas de las materias primas forestales maderables y no maderables, así como de las tecnologías e industrias de estas materias primas.* En el caso del presente TFG, aplicados al aprovechamiento de las diferentes alternativas de biomasa estudiadas.
- *Capacidad para diseñar, dirigir, elaborar, implementar e interpretar proyectos y planes, así como para redactar informes técnicos, memorias de reconocimiento, valoraciones, peritajes y tasaciones.* En el caso del presente TFG relativo al estudio de viabilidad del aprovechamiento de la cáscara de pistacho de la plantación objeto de este estudio.
- *Capacidad para entender, interpretar y adoptar los avances científicos en el campo forestal, para desarrollar y transferir tecnología y para trabajar en un entorno multilingüe y multidisciplinar.* Como se ha indicado anteriormente, en el presente TFG referente al aprovechamiento de la biomasa, siendo en este estudio la cáscara de pistacho, como combustible calorífico para diversos equipos de combustión.

4.CASO DE ESTUDIO.

4.1. Descripción de la plantación

Para realizar el estudio de viabilidad del aprovechamiento de la cáscara de pistacho para su uso como combustible calorífico, se ha seleccionado concretamente una plantación de este cultivo ubicada en una finca en el término municipal de Perales perteneciente a la comarca de Tierra de Campos en la provincia de Palencia. Su localización se encuentra representada por un punto negro en la Figura 9 y uno verde en la Figura 10 y en la Figura 11 con sus límites marcados en verde.

Esta plantación fue establecida en el año 1995 en el polígono 4 y está formada por cinco parcelas, en concreto desde la 5038 a la 5042 como se muestra en la Figura 12.



Figura 9. Localización de la plantación en la Comunidad Autónoma de Castilla y León.
Escala: 1:150.000. Fuente: Pinterest.

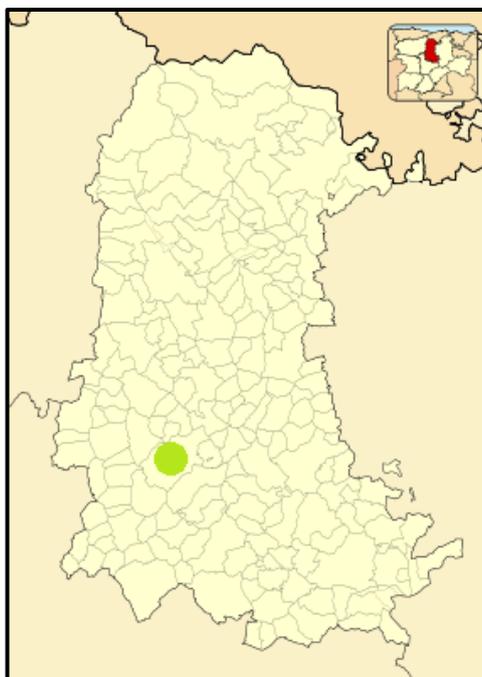


Figura 10. Localización de la plantación en la provincia de Palencia.
Escala: 1:120.000. Fuente: Wikipedia.



Figura 11. Localización de la finca en la localidad de Villaldavín en el municipio de Perales.
Escala: 1:20.000. Fuente: SIGPAC.



Figura 12. División de la finca en las parcelas desde la 5038 hasta la 5042.
Escala: 1:5.000. Fuente: SIGPAC.

Los datos de esta finca son:

- Latitud = $40^{\circ} 10' 25,728''$ N
- Longitud = $4^{\circ} 35' 7,615''$ W
- Coordenadas UTM Huso 30N = 369.053,2 m, 4.670.291,3 m
- Altitud sobre el nivel del mar = 770 msnm
- Superficie Total = 16,4004 ha
 - Parcela 5038 = 1,9036 ha
 - Parcela 5039 = 3,8078 ha
 - Parcela 5040 = 3,1698 ha
 - Parcela 5041 = 2,9949 ha
 - Parcela 5042 = 4,5243 ha

5.EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS.

5.1. Biomasa y combustión

La biomasa es la materia orgánica empleada como fuente de energía dado que presenta un elevado potencial energético. En cuanto a su composición, numerosos estudios muestran que es variable y compleja representada principalmente por compuestos orgánicos como la hemicelulosa, celulosa, lignina, aromáticos o aminoácidos entre otros, y en una menor proporción por materia inorgánica como nitratos o minerales además de una fase fluida de agua y gases entre otros.

La celulosa y la lignina son componentes que como se ha explicado anteriormente requieren de temperaturas más elevadas para su combustión a diferencia de la hemicelulosa.

Además, las fracciones contenidas en la biomasa son variables especialmente en los compuestos inorgánicos de acuerdo a su diversidad biológica, fuente y origen.

Existen diferentes tipos de biomasa entre los que se encuentran todos los recogidos en el A. II que son la cáscara de avellana, la cáscara de almendra, la cáscara de castaña, la cáscara de pistacho, así como, el hueso de aceituna y los pellets.

La valoración de la biomasa se lleva a cabo a través de cuatro procesos básicos que la permiten transformarse en calor y electricidad que son la combustión, la torrefacción, la gasificación y la pirólisis.

La combustión es el fenómeno físico-químico que tiene como objetivo aprovechar de forma inmediata la energía contenida en la biomasa y convertirla en forma de calor. Por este motivo, la combustión de biomasa es ampliamente usada para la producción de energía para generar vapor en las calderas.

La combustión es un tipo de reacción química exotérmica en la que tiene lugar la oxidación de los componentes del combustible, es decir, del carbono y del hidrógeno que se combinan con el oxígeno del aire. En el caso de que el combustible tenga azufre, su combustión proporciona óxidos de azufre y se producen productos corrosivos si se permite que se condense el agua de los humos y los óxidos de azufre se disuelvan en ella. Sin embargo, si el combustible presenta nitrógeno y otros componentes no combustibles, estos elementos pasan sin sufrir ninguna modificación, pero una mínima cantidad de nitrógeno será combinada con el oxígeno dando lugar a los óxidos nitrosos.

Al combustible se le asignan dos valores de calor de combustión dado que el calor latente de vaporización del agua no es útil en un proceso de combustión:

- Poder calorífico superior (PCS) = El agua se extrae como líquido en los productos de la combustión.
- Poder calorífico inferior (PCI) = El agua se extrae como vapor en los productos de la combustión.

Para que tenga lugar la combustión, es necesario que exista aire de combustión suficiente pero no excesivo.

La combustión puede ser completa o incompleta dependiendo de la turbulencia. Será completa cuando el combustible y el aire se encuentren perfectamente mezclados e incompleta en el caso contrario siendo la temperatura de la llama menor y el combustible necesitará de más tiempo para quemarse además de producir una menor cantidad de óxidos de nitrógeno.

La torrefacción es el proceso por el que tiene lugar la descomposición térmica de la biomasa a unas temperaturas entre 200 y 300 °C a presión atmosférica y en ausencia de agentes oxidantes. Mediante este proceso, se produce la eliminación de productos orgánicos volátiles y de agua a la vez que tiene lugar un acortamiento de las largas cadenas de polisacáridos.

La gasificación es el proceso que permite elevar la temperatura a un valor suficiente para producir la liberación de compuestos volátiles y así poder ser transportados a otros sitios para que experimenten su combustión.

Este proceso permite aumentar la densidad energética de la biomasa y poder controlar de mejor forma la combustión. Existen múltiples gasificadores a nivel industrial, siendo los más comunes los de lecho descendente en los que se produce un proceso de combustión de la biomasa con falta de aire cuyo objetivo es quemar el carbón fijo y generar el calor necesario para que tenga lugar la liberación de los compuestos volátiles.

El último proceso a tener en cuenta para la valoración de la biomasa es la pirólisis que se trata de un proceso muy usado y tiene como objetivo la mejora de las propiedades del combustible, principalmente de la densidad energética, dado que la biomasa presenta un mayor poder calorífico por unidad de kilogramo a diferencia del carbón, por lo que se requieren grandes volúmenes de almacenamiento del último.

Por este motivo, la pirólisis es un proceso complejo muy empleado en la producción de biocombustibles líquidos, gaseosos y sólidos. Además, permite obtener diferentes propiedades y cantidades para una biomasa determinada a partir de la velocidad de calentamiento, por ejemplo, en la pirólisis rápida se obtiene una mayor cantidad de bio-aceite que de bio-gas.

Sin embargo, la pirólisis de baja temperatura es un método muy importante actualmente que mejora las propiedades de la biomasa como combustible sólido y ha sido muy útil para su empleo como pretratamiento de desechos sólidos urbanos aumentando así su densidad energética al mismo tiempo que se provoca una disminución de su humedad obteniendo un combustible con un mayor rendimiento energético dentro del hogar.

5.2. Características de la biomasa para su combustión

Para conocer la verdadera rentabilidad de la cáscara de pistacho como combustible calorífico y su comportamiento frente a la combustión, es importante conocer su humedad, su poder calorífico y su porcentaje de residuo producido. También es importante conocer estas características del resto de tipos de biomasa considerados en este estudio para realizar una comparativa detallada a continuación.

5.2.1. Humedad

La humedad es la cantidad de agua presente en la biomasa, expresada como porcentaje del peso. Se trata del factor más importante dado que es el determinante de la energía que se podría obtener por medio de la combustión.

El contenido de humedad tiene especial interés durante todo el proceso debido a que su presencia provoca una reducción del poder calorífico de la biomasa afectando al funcionamiento óptimo del proceso. Por ejemplo, si durante la combustión existe un contenido de humedad superior al 50%, el encendido de la biomasa se vería perjudicado.

La humedad de la biomasa se puede medir empleando diferentes métodos. Sin embargo, la forma más común y la empleada para los datos recogidos en este estudio es la medida con estufa de secado consistente en calcular la diferencia de peso entre una muestra de biomasa húmeda y otra que ha experimentado el secado en una estufa durante varias horas.

En la Tabla 8 se recogen los datos de humedad medidos de los diferentes tipos de biomasa analizados en este estudio.

En la tabla siguiente se recogen dos valores del contenido en humedad de la cáscara de pistacho, uno correspondiente al obtenido de la bibliografía y otro al pistacho producido de la variedad "Kerman" de la plantación de Perales.

No se han encontrado datos referentes al contenido en humedad de la cáscara de castaña.

Tabla 8. Contenido de humedad de los diferentes tipos de biomasa. Fuente: Elaboración propia a partir de fuentes referidas en el A. I y datos experimentales para pistacho.

RESIDUO	HUMEDAD (%)	HUMEDAD (g / 100 g)
Cáscara de Pistacho	7,00	7,00
Cáscara de Pistacho Plantación	7,62	7,62
Cáscara de Avellana	12,00	12,00
Cáscara de Castaña	-	-
Cáscara de Almendra	14,20	14,20
Hueso de Aceituna	31,00	31,00
Pellets	9,50	9,50

Para que el proceso de la combustión tenga lugar de forma eficiente, se libere una menor proporción de humo y hollín y el impacto ambiental sea mínimo, la biomasa a emplear deberá presentar un contenido en humedad inferior o igual al 20%.

Por este motivo, y como se muestra en la tabla anterior, la humedad del hueso de aceituna supera los valores adecuados por lo que debe experimentar un proceso de secado previo a su empleo como combustible.

Sin embargo, los pellets experimentan el proceso de secado durante su fabricación mediante la compresión del serrín estando así ya listos para ser aprovechados en la combustión.

En el caso del resto de tipos de biomasa presentan un contenido en humedad adecuado para ser directamente combustionados implicando una reducción de costes de fabricación con respecto a los pellets o al hueso de aceituna.

5.2.2. Poder Calorífico

El poder calorífico es la cantidad de energía en forma de calor que puede generarse al oxidarse de forma completa la biomasa empleada. Esta característica se mide de forma regular en energía por unidad de kilogramo para combustibles sólidos, por unidad volumétrica para líquidos y molar para gaseosos.

El poder calorífico de los diferentes tipos de biomasa que se tienen en cuenta en este estudio se encuentra recogido en la Tabla 9 y expresado en unidades de energía liberada por cada kilo de biomasa, es decir, en MJ/kg y en kcal/kg.

Tabla 9. Poder calorífico de los diferentes tipos de biomasa. Fuente: Elaboración propia a partir de fuentes referidas en el A. I y datos experimentales para pistacho.

RESIDUO	PC (MJ/kg)	PC (kcal/kg)
Cáscara de Pistacho	19,26	4.601,05
Cáscara de Pistacho Plantación	25,33	6.051,12
Cáscara de Avellana	19,30	4.610,61
Cáscara de Castaña	-	-
Cáscara de Almendra	20,01	4.780,22
Hueso de Aceituna	18,84	4.500,00
Pellets	17,50	4.180,00

El poder calorífico de la cáscara de pistacho procedente de la producción de la variedad "Kerman" de la plantación del municipio de Perales se calcula mediante la fórmula procedente de (Demirbas, A. (1997). Calculation of higher heating values of biomass fuels. *Fuel*, 76(5), 431-434.) expresada a continuación:

$$HHV = 0,196 \times (FC) + 14,199$$

Esta fórmula depende de la FC que es la función del carbono fijo expresada en porcentaje en peso y tal y como se recoge en la Tabla 7 según el análisis realizado del residuo, la FC de la cáscara de pistacho objeto de este estudio es 57,20% sobre materia seca.

Por tanto, el poder calorífico de este residuo es:

$$HHV = 0,196 \times 57,20\% + 14,199 = \mathbf{25,33 \text{ MJ/kg}}$$

El poder calorífico de la cáscara de pistacho recogido en la tabla anterior se ha obtenido de la bibliografía, en concreto del artículo de (Ibarra y Rueda, 2017), de tal forma, que se puede observar una variación aproximada del 6% siendo mayor el de la plantación objeto de estudio, suponiendo una ventaja a la hora de ser aprovechado como combustible calorífico.

Según la Tabla 9, el poder calorífico de todos los tipos de biomasa considerados en este estudio ronda entre el 18% y el 25%, existiendo una escasa diferencia entre ellos. Sin embargo, los que presentan un mayor valor de esta característica destacan por ser óptimos como generadores de calor y son la cáscara de almendra y la cáscara de pistacho procedente de la plantación ubicada en Perales.

Es importante tener en cuenta que no se han podido obtener datos del poder calorífico de la cáscara de castaña debido a su prácticamente inapreciable aprovechamiento como biomasa.

5.2.3. Volumen de residuo obtenido

Una vez conocidas las características más importantes para evaluar la viabilidad de los diferentes tipos de biomasa, es necesario saber qué porcentaje de residuo aprovechable como biomasa se obtiene por cada año de producción de cada tipo de alternativa considerada en este estudio.

El volumen de cáscara de pistacho producido se explica a continuación y el del resto de cultivos leñosos y tipos de biomasa se encuentra detallado en el A. I.

Los rendimientos obtenidos del pistacho dependen de si procede de variedades de fruto de calibre grande o de variedades de fruto de calibre pequeño.

La producción de las variedades de pistacho de fruto de calibre grande como “Lost Hill”, “Golden” y “Kerman”, está destinada al consumo como aperitivo y según el productor de la plantación objeto, el 80% de la cosecha se dirige a su venta directa sin necesidad de experimentar un cascado previamente. Además, el 20% restante de la producción experimenta un proceso de eliminación de la cáscara con el objetivo de obtener el grano. En este caso, el 60% de este 20% de producción se corresponde con la cáscara.

Sin embargo, la cosecha de las variedades de fruto de calibre pequeño como “Larnaka” o “Silora”, está destinada a la industria y, por tanto, la totalidad de la producción va a ser cascada correspondiéndose un 40% al grano y un 60% a la cáscara.

A mayores, hay que tener en cuenta que aproximadamente un 15% de la producción independientemente de la variedad corresponde a pistachos vanos y no aprovechables que son secados y almacenados con la cáscara.

Para representar de forma más clara lo expresado anteriormente, se recogen los porcentajes de producción de pistachos vanos, de grano y de cáscara respecto a la producción total de pistacho para las variedades de calibre grande en la Figura 13 y para las variedades de calibre pequeño en la Figura 14.

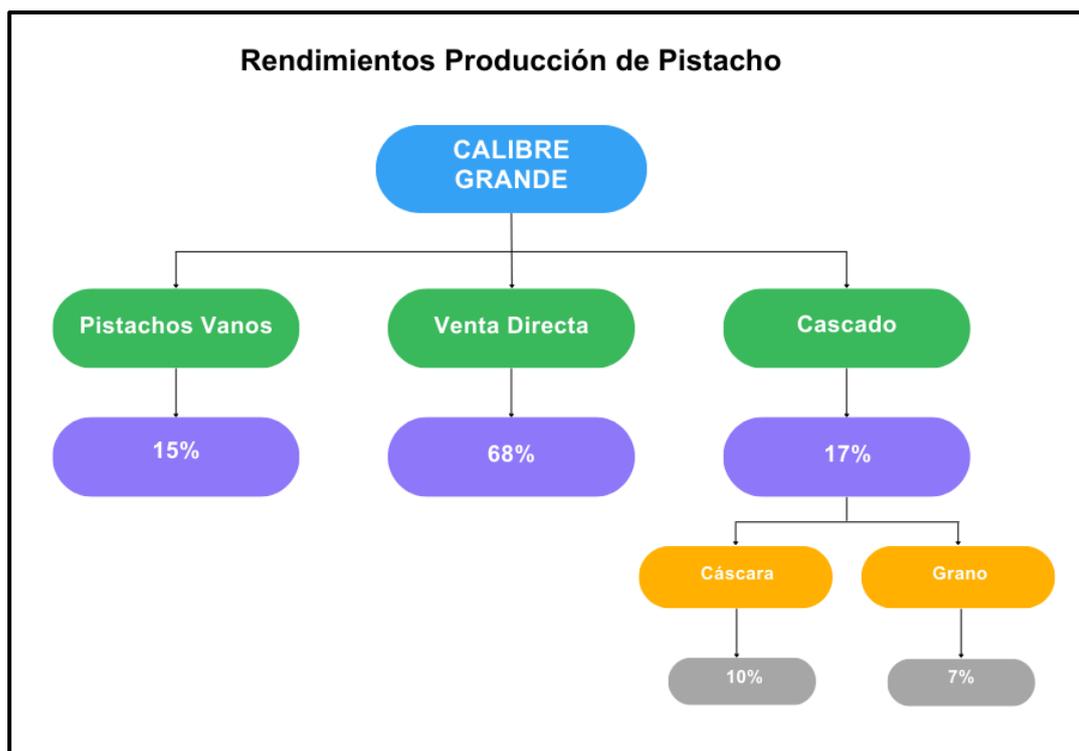


Figura 13. Rendimientos de la producción de las variedades de pistacho de calibre grande. Fuente: Elaboración propia a partir de datos facilitados por la procesadora "Agroforestales Esla" (Villalpando).

Como se muestra en la figura anterior, de 1.000 kg obtenidos de producción de pistacho de variedad de calibre grande, se producen:

- 150 kg de pistachos vanos (15%).
- 680 kg de pistachos que van a experimentar la venta directa (68%).
- 170 kg de pistachos que van a ser cascados (17%) = 100 kg de cáscara (10%) + 70 kg de grano (7%).

De esta forma, teniendo en cuenta y como se ha mencionado anteriormente que los pistachos vanos se tratan de la misma forma que la cáscara, de 1.000 kg de producción, 250 kg se consideran residuo (cáscara + pistachos vanos = 10% + 15%) y podrían ser aprovechados como combustible calorífico, es decir, el residuo se correspondería con un 25% de la producción.

En el caso particular de la plantación objeto de este estudio, la producción pertenece a la variedad "Kerman", variedad de fruto de calibre grande, de la que se han obtenido en la última campaña una totalidad de 6.963 kg. Sabiendo que la superficie de producción es de 16,40 ha, el rendimiento ha sido de aproximadamente 425 kg/ha. Como el porcentaje de residuo según lo explicado anteriormente, es decir, la suma del porcentaje de cáscara y de pistachos vanos es de un 25%, el residuo obtenido en la última campaña en esta plantación es de 1.741 kg.

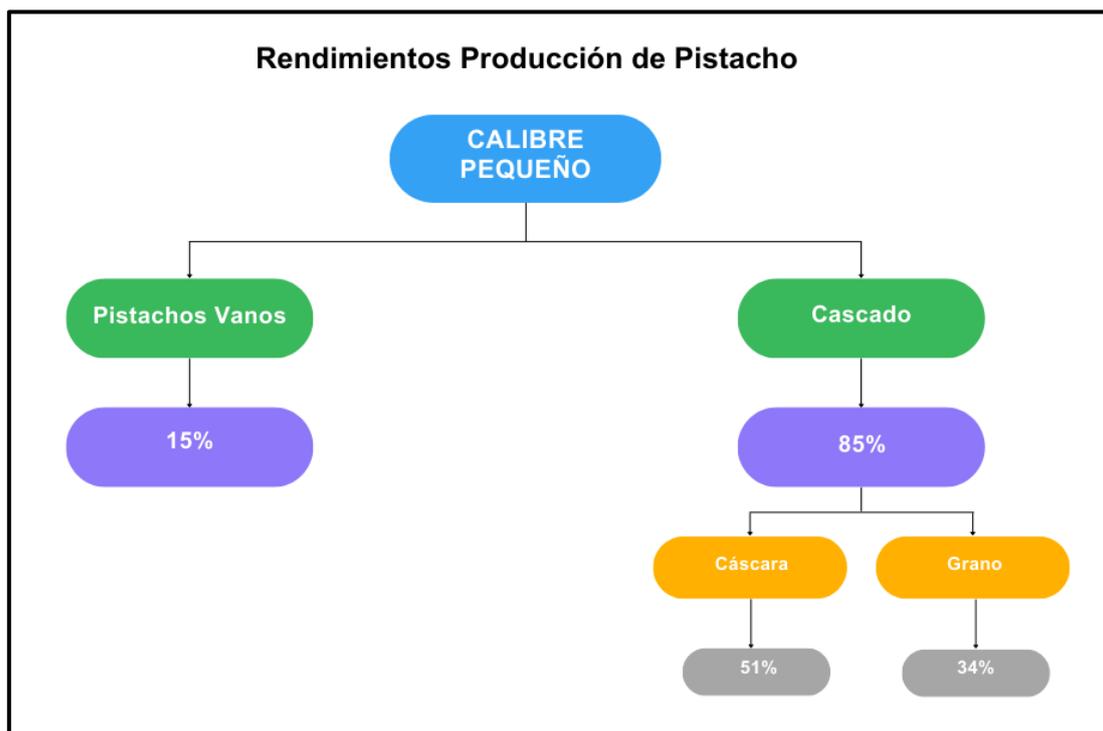


Figura 14. Rendimientos de la producción de las variedades de pistacho de calibre pequeño. Fuente: Elaboración propia a partir de datos facilitados por la procesadora "Agroforestales Esla" (Villalpando).

En la Figura 14, sin embargo, se observa que, de 1.000 kg de producción obtenida de pistacho de variedad de calibre pequeño, se producen:

- 150 kg de pistachos vanos (15%).
- 850 kg de pistachos destinados al cascado (85%) = 510 kg de cáscara (51%) + 340 kg de grano (34%).

Por tanto, el residuo total obtenido por 1.000 kg de producción en el caso de las variedades de calibre pequeño es de 660 kg sumando la cáscara y los pistachos vanos (51% + 15%), es decir, de un 66%.

Todos los datos anteriores se recogen en la Tabla 10 en la que se realiza un análisis comparativo de los rendimientos de las variedades de calibre grande y de calibre pequeño.

Además, en la Tabla 10 se recogen los rendimientos concretos de la plantación objeto del estudio situada en Perales correspondiente a una variedad de fruto de calibre grande, la variedad "Kerman".

Tabla 10. Rendimientos de la producción de pistacho dependiendo del calibre. Fuente: Elaboración propia a partir de datos facilitados por la procesadora "Agroforestales Esla" (Villalpando).

VARIEDAD		PISTACHOS VANOS	VENTA DIRECTA	CASCADO		TOTAL RESIDUO	TOTAL PRODUCCIÓN
				CÁSCARA	GRANO		
CALIBRE GRANDE	%	15%	68%	10%	7%	25%	100%
	KG	150	680	100	70	250	1.000
CALIBRE PEQUEÑO	%	15%	0%	51%	34%	66%	100%
	KG	150	0	510	340	660	1.000

Tabla 11. Rendimientos de la plantación del municipio de Perales. Fuente: Elaboración propia a partir de datos facilitados por la procesadora "Agroforestales Esla" (Villalpando).

RENDIMIENTOS DE LA PLANTACIÓN DE PERALES						
VARIEDAD "KERMAN"	PISTACHOS VANOS	VENTA DIRECTA	CASCADO		TOTAL RESIDUO	TOTAL PRODUCCIÓN
			CÁSCARA	GRANO		
PORCENTAJE	15%	68%	10%	7%	25%	100%
KG	1.044	4.735	696	488	1.740	6.963

En la Tabla 12 se recoge un resumen del volumen de residuo obtenido de cada tipo de biomasa tanto en porcentaje como en kg por t de producción. Excepto en el caso del pistacho que se ha explicado anteriormente, el volumen de residuo de las diferentes alternativas consideradas en este estudio de viabilidad se encuentra desarrollado en el A. I.

Tabla 12. Volumen de residuo obtenido de los diferentes tipos de biomasa. Fuente: Elaboración propia a partir de fuentes referidas en el A. I.

RESIDUO		VOLUMEN (%)	VOLUMEN (kg/t producción)
Cáscara de Pistacho	Calibre Grande	25	250
	Calibre Pequeño	66	660
Cáscara de Pistacho Plantación		25	250
Cáscara de Avellana		71	710
Cáscara de Castaña		10	100
Cáscara de Almendra		75	750
Hueso de Aceituna		15	150
Pellets		-	-

El volumen de residuo obtenido correspondiente a la cáscara de pistacho de la plantación objeto es igual que el de la cáscara de pistacho procedente de variedades de calibre grande, es decir, de 250 kg por t de producción. Sin embargo, como se sabe que la producción total de la última campaña ha sido de 6.963 kg, el residuo total generado es de 1.740 kg.

Los pellets son aprovechados al 100% dado que son un subproducto procedente de la madera.

El volumen de residuo de la cáscara de castaña es de un 71% ya que se considera tanto la cáscara que supone un 65% de la producción como la cascarilla que supone un 6% de la misma como se explica detalladamente en el A. II.

En conclusión, como se puede observar en la Tabla 12, los residuos que se generan en mayor proporción son la cáscara de almendra, la cáscara de avellana y la cáscara de pistacho procedente de variedades de calibre pequeño.

5.3. Equipos de combustión

Los equipos de combustión son cualquier aparato en el que en su interior tiene lugar el proceso de combustión de algún combustible en estado sólido, líquido o gaseoso produciéndose así energía calorífica encargada de aumentar la temperatura de un fluido o de generar vapor.

Existen diferentes tipos, pero los más relevantes son las calderas y las estufas. Una caldera tiene el principal objetivo de ofrecer agua caliente sanitaria y calor mientras que una estufa únicamente se fabrica con la finalidad de aportar calor en la estancia instalada. De forma más concreta, una caldera presenta la capacidad de calentar una mayor superficie además de en algunos casos

poder aportar agua caliente sanitaria mientras que una estufa calentaría espacios más reducidos sin existir la posibilidad de dotar de agua caliente sanitaria.

En este estudio, los equipos de combustión seleccionados por su mayor adecuación son las calderas.

Las calderas son recipientes metálicos cerrados cuya función es producir vapor o calentar un fluido a una presión superior que la atmosférica y a una temperatura mayor a la del ambiente mediante la aplicación del calor procedente de la combustión de algún combustible sólido, líquido o gaseoso.

Las calderas contienen una cámara donde tiene lugar la combustión gracias al aire comburente. Posteriormente, un intercambiador de calor se encarga de transmitir el calor producido por la combustión al fluido caloportador que a su vez se encarga de trasladar el calor a los puntos de consumo. Durante el aumento de la temperatura del fluido caloportador de una caldera, se ven implicados los siguientes tres mecanismos de transmisión de calor:

- Conducción = tiene lugar debido al contacto directo entre el cuerpo de la caldera que contiene el fluido caloportador y la llama.
- Radiación = el calor se transmite desde la llama a las paredes del hogar donde ocurre la combustión.
- Convección = el calor es trasladado desde los humos calientes originados en la combustión a las partes metálicas que conforman la caldera.

Existen diferentes tipos de calderas dependiendo del criterio de clasificación que se emplee:

- Dependiendo de la posición relativa entre los gases de combustión y el fluido a calentar:
 - o Calderas acuotubulares = el fluido a calentar es desplazado por el interior de los tubos y los gases de combustión viajan por el exterior de los mismos.
 - o Calderas pirotubulares = los gases de combustión circulan por el interior de los tubos, pero en este caso, los tubos se encuentran sumergidos en el agua.

En función de la disposición del haz tubular, las calderas pirotubulares se clasifican en:

- Calderas pirotubulares verticales = disposición del haz tubular desde la parte inferior a la parte superior de la caldera.
- Calderas pirotubulares horizontales = disposición del haz tubular desde la parte delantera a la trasera.

En función del número de haces tubulares, estas calderas se clasifican en:

- Calderas pirotubulares de un paso de recorrido de los gases.
- Calderas pirotubulares de varios pasos de gases.

- Atendiendo a la naturaleza del fluido caloportador y a la temperatura a la que se vaya a encontrar durante el proceso:
 - o Calderas de agua caliente = en este tipo de calderas, el fluido caloportador es el agua y su temperatura máxima de servicio es menor de 100 °C.
 - o Calderas de agua sobrecalentada = en este caso, el fluido caloportador es el agua sometida a presión y su temperatura máxima de servicio supera los 100 °C.
 - o Calderas de vapor = el fluido caloportador es vapor de agua.
 - o Calderas de fluido térmico = el fluido caloportador es diferente al agua.
- Según el tipo de combustible empleado para generar calor, las calderas se clasifican en:
 - o Calderas eléctricas = requieren de energía eléctrica y en ellas no se produce el proceso de la combustión.
 - o Calderas de combustibles líquidos = calderas alimentadas por gasoil que debe ser almacenado en la vivienda.

- Calderas de combustibles sólidos = calderas de biomasa o de pellets que emplean combustibles vegetales para su funcionamiento siendo así un tipo de calderas sostenibles.
- Calderas de combustibles gaseosos = estas calderas se alimentan mediante gas.
 - Calderas de gas butano = el gas butano es suministrado mediante bombonas, aunque suelen ser poco eficaces.
 - Calderas de gas propano = este gas se puede suministrar de distintas formas bien sea a granel, encauzado...
 - Calderas de gas natural = requiere de una instalación para permitir la conexión de las calderas a la red de suministro siendo un gas ecológico y de precio reducido.
- En función del sistema de funcionamiento, existen tres distintos tipos de calderas:
 - Calderas estancas = obtienen el oxígeno del exterior y los gases generados por la caldera son expulsados a su exterior. Son calderas muy seguras debido a que presentan una cámara de combustión aislada de forma hermética del ambiente de la sala en que se encuentran instaladas.
 - Calderas de gas condensación = el calor generado por el enfriamiento del vapor de agua del interior del humo de la combustión de las calderas mixtas es reutilizado para precalentar el agua sanitaria.
 - Calderas atmosféricas = poseen un compartimento de combustión abierto, de tal manera que, el aire empleado para la combustión es el que se encuentra en la estancia donde se encuentran instaladas. Actualmente, según la normativa vigente, este tipo de calderas ya no se pueden instalar.

Una vez detallados los diferentes tipos de calderas, en este estudio únicamente se van a valorar las calderas de combustibles sólidos, y más concretamente las policombustible, es decir, las calderas de biomasa que tienen la capacidad de alimentarse empleando cáscara de pistacho o cualquiera de las alternativas valoradas a lo largo de este estudio.

Para buscar las calderas de biomasa más adecuadas, primero hay que elegir la potencia ideal de la caldera. Para ello, es importante conocer la superficie destinada a ser calentada. En el caso de este estudio de viabilidad, se va a suponer que se requiere una caldera para alimentar el proceso de secado de una procesadora de pistacho y otra caldera para calentar una vivienda completa de 144 m², debido a que, según los datos del Catastro se trata del tamaño medio de las casas en España.

Para ello, es necesario conocer que se requiere aproximadamente 1 kW de potencia por cada 10 m² de superficie, por lo que, en el caso de una vivienda de 144 m², como se ha considerado anteriormente, la potencia total necesaria de la caldera es de 14,4 kW, es decir, de 15 kW como mínimo.

5.3.1. Equipos de combustión industriales

Los equipos de combustión industriales se caracterizan por tener potencias más elevadas que las domésticas y, por tanto, un tamaño también mayor siendo así ideales para un procesado que requiera de unas mayores dimensiones como puede ser el secado del pistacho.

Es importante distinguir entre equipos de combustión con cogeneración o sin ella tanto por su funcionamiento como por su sostenibilidad y rentabilidad.

5.3.1.1. Equipos de combustión industriales con cogeneración

El proceso de cogeneración permite generar dos tipos de energía, la electricidad y el calor, al mismo tiempo partiendo de una única fuente de energía que, en este caso, será un combustible sólido y más concretamente, la cáscara de pistacho.

Se estima que un equipo de combustión con cogeneración es capaz de aprovechar un 85-90% de toda la energía primaria mientras que un equipo de combustión encargado de generar electricidad de forma convencional, aprovecha únicamente un 30-40% del total. De esta forma, un equipo de combustión con cogeneración se trata de un sistema de producción de energía más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

El sistema ORC (Ciclo Orgánico Rankine) o de cogeneración se basa en un tipo de turbina que posee el mismo funcionamiento que una de vapor convencional encargada de transformar la energía térmica en energía eléctrica. La excepción de este sistema es que el fluido orgánico que vaporiza presenta una velocidad de rotación menor en la turbina, una inexistencia de erosión en las partes mecánicas y una presión reducida de trabajo.

Los sistemas de cogeneración alimentados con biomasa, como sería este caso, producen energía tal y como se muestra en la Figura 15.

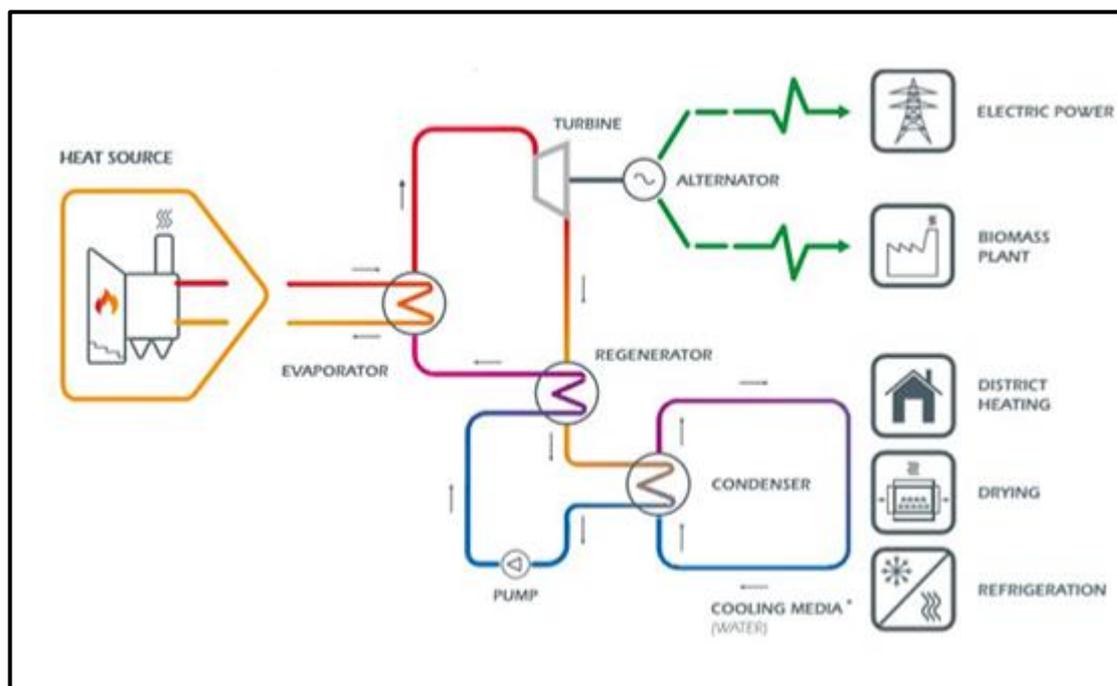


Figura 15. Funcionamiento de una caldera con cogeneración. Fuente: SUGIMAT S.L.

Tal y como se muestra en la figura anterior, una caldera de fluido térmico se encarga de ceder o bien el calor proveniente de la combustión de la biomasa o bien directamente el residuo sólido al fluido térmico. Posteriormente, es intercambiado con el fluido orgánico responsable de mover la turbina para que tenga lugar la producción de energía.

Existen varios fabricantes que diseñan calderas industriales con cogeneración que son los siguientes:

- Kohlbach (Austria) diseña calderas de aceite térmico, que poseen una salida nominal de la caldera de entre 3.300 y 12.000 kW de potencia y producen energía eléctrica y calor mediante una turbina ORC.

Existe la posibilidad de que presente conductos múltiples distribuidos con el fin de funcionar de forma continua durante un largo período de tiempo hasta con combustibles heterogéneos como puede ser la corteza.

También puede poseer sistemas de tres conductos de humos rentables y que permiten el ahorro de espacio en configuración en espiral.

- Calderería López Hermanos, S.A. (España) diseña una gran variedad de calderas de vapor con cogeneración:
 - o Caldera de vapor de cogeneración CRP
 - o Caldera de agua caliente de cogeneración CRPA
 - o Caldera de vapor mixta CRM
 - o Caldera de agua caliente de cogeneración CAG
 - o Caldera de vapor acuotubular de cogeneración CRA

Las calderas de agua caliente van a ser descartadas dado que el principal objetivo de este estudio es la obtención de energía en forma de calor con el objetivo de aumentar la temperatura de una estancia o de emplear este calor para procesos como puede ser el secado del pistacho y no de dotar de agua caliente sanitaria.

De esta forma, las calderas industriales con cogeneración de este fabricante a tener en cuenta en este estudio son:

- o Caldera de vapor de cogeneración CRP = Caldera del tipo pirotubular, presenta tubos de diferentes diámetros dependiendo de la naturaleza de los humos de calentamiento, configuración horizontal, y, posibilidad de incorporar economizador y precalentador. Además, según las necesidades de la planta, la caldera puede presentar las siguientes configuraciones:
 - Simple = únicamente recuperación.
 - Mixta = recuperación y quemador.
 - Múltiple entrada de humos = el lado de los gases de forma separada y el lado del agua de forma común.
- o Caldera de vapor mixta CRM = Caldera del tipo pirotubular, presenta tubos de diferentes diámetros dependiendo de la naturaleza de los humos de calentamiento, configuración horizontal. y, posibilidad de incorporar economizador. Dependiendo de las necesidades de la planta, la caldera puede poseer una o varias entradas de humos.
- o Caldera de vapor acuotubular de cogeneración CRA = Caldera del tipo acuotubular, gran superficie de calefacción en poco espacio, y, posibilidad de incorporar economizador y precalentador.
- SUGIMAT S.L. (Francia) fabrica plantas de cogeneración para casos especializados como puede ser el de una caldera de vapor alimentada con orujo de aceituna en la provincia de Jaén para la mayor fábrica de aceite de oliva de Europa. La caldera para esta situación presenta una potencia térmica de 11 MW siendo capaz de producir 15 t/h de vapor. Este modelo de caldera se encuentra fabricado empleando el diseño del modelo "Ecknokessel" de ERK (Alemania).

ERK se encarga de diseñar calderas especiales que son sistemas capaces de satisfacer necesidades individualizadas como es el caso de la producción simultánea de vapor y agua caliente, es decir, de la cogeneración. Además, estas calderas pueden alimentarse empleando cualquier tipo de combustible.

En el caso particular del presente estudio de viabilidad, se encargarían de diseñar una caldera de vapor específica que permitiese el quemado de la cáscara de pistacho para la producción de energía tanto en forma de calor como eléctrica.

El precio y las características específicas de cada tipo de caldera industrial no se puede conocer dado que depende de las dimensiones requeridas y específicas del proceso que se va a llevar a cabo. Esto se debe calcular de forma individualizada por parte del fabricante para que el equipo resultado sea lo más eficiente y óptimo posible.

5.3.1.2. Equipos de combustión industriales sin cogeneración

Los equipos de combustión industriales sin cogeneración son equipos que no experimentan este proceso y, por tanto, son menos eficientes que los anteriores produciendo únicamente o bien energía térmica o bien energía eléctrica.

No se van a tener en cuenta las calderas de agua caliente ya que no es el fin de este estudio, únicamente se van a valorar las destinadas a producir energía en forma de calor.

Estos equipos son producidos por los mismos fabricantes que los que experimentan el proceso de cogeneración:

- Kohlbach (Austria) se encarga de diseñar calderas de vapor que poseen una salida nominal de entre 400 y 15.000 kW de potencia y producen energía eléctrica mediante una turbina o motor de vapor. Además, su presión de funcionamiento comprende entre 0,5 y 40 bar.
- Calderería López Hermanos, S.A. (España) fabrica diferentes tipos de calderas de vapor que no experimentan el proceso de cogeneración:
 - o Caldera de vapor pirotubular GVL-H = Caldera del tipo pirotubular, disposición horizontal con hogar interior centrado, combustión completa dentro del hogar, hogar rodeado y refrigerado por agua, y, el humo generado invierte su sentido de circulación aprovechando así al máximo su calor.
El hogar en una caldera es la parte donde se encuentran las temperaturas más altas dado que es lugar de la misma donde se quema el combustible.
 - o Caldera de vapor pirotubular CBC = Caldera del tipo pirotubular, el hogar es interior del tipo horizontal centrado, la combustión es completa dentro del hogar, y, el humo producido retorna al hogar con el objetivo de aprovechar al máximo el calor.
 - o Caldera de vapor acuotubular CIT = Caldera del tipo acuotubular, configuración en delta, con tabiquería externa refractaria, y, presenta tres pasos de humos con paredes de agua. Los tubos de caldera van a estar conectados a los colectores que componen la caldera.
- ERK (Alemania) se encarga de diseñar diversos tipos de calderas entre las que se encuentran las calderas pirotubulares, ideales para el empleo de forma industrial. En las calderas pirotubulares, los gases de combustión atraviesan el horno y varios tubos de humo para que se produzca vapor y agua caliente.
El fabricante ERK se encarga de producir este tipo de calderas, pero de forma compacta y presentando un bajo coste.

5.3.2. Equipos de combustión domésticos

Las calderas domésticas son las calderas que se emplean para el calentamiento de las viviendas además de tener la capacidad en ocasiones de dotarlas de agua caliente sanitaria.

Las calderas policombustible tienen la capacidad de alimentarse mediante diferentes tipos de biomasa entre los que se pueden encontrar la leña, el carbón, los pellets, el hueso de aceituna, la cáscara de pistacho...

5.3.2.1. Equipos de combustión domésticos con cogeneración

En el caso de los equipos de combustión domésticos, no se habla de cogeneración sino de microcogeneración, es decir, de cogeneración doméstica, el proceso que permite producir energía térmica y eléctrica simultáneamente.

En el proceso de la microcogeneración, la energía eléctrica se genera a través de un alternador que se encuentra acoplado a un eje que gira gracias a un motor. La energía térmica es generada empleando los gases de escape y el agua de refrigeración del motor pudiendo así convertir la energía térmica en agua caliente bien para calefacción o para la obtención de agua caliente sanitaria.

El funcionamiento de la microcogeneración se encuentra representado gráficamente en la Figura 16.

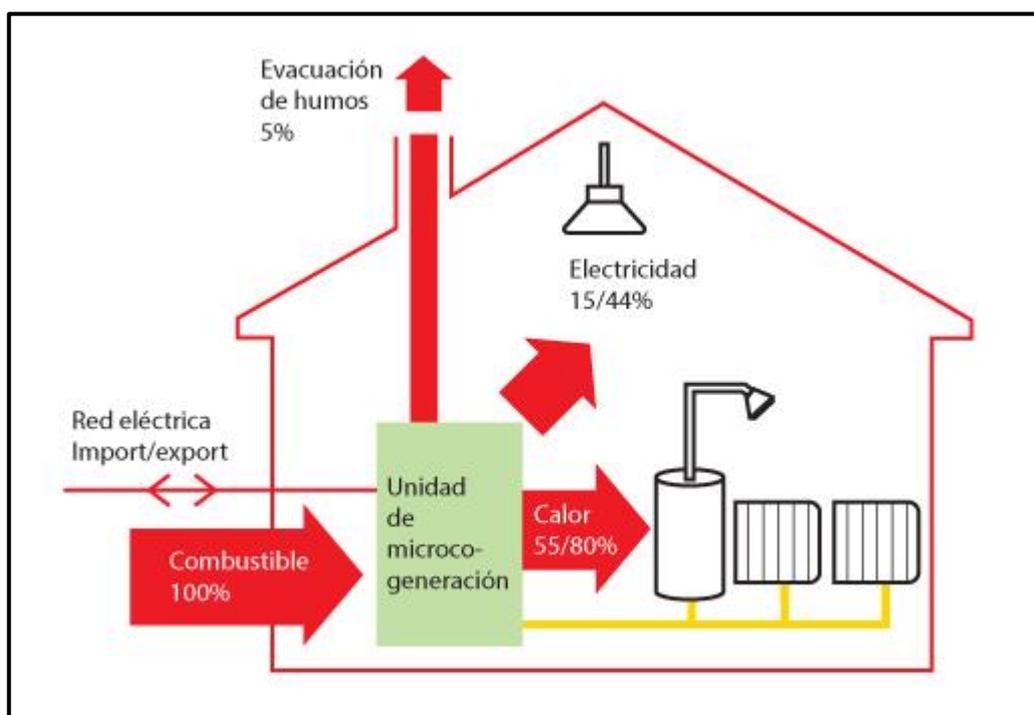


Figura 16. Funcionamiento de la microcogeneración. Fuente: OCU, 2023.

Los fabricantes de las calderas domésticas que experimentan el proceso de microcogeneración son los siguientes:

- ENERGYLAB (España) ha diseñado una caldera policomcombustible con una potencia de 60 kW que permite obtener agua caliente de una temperatura de hasta 90 °C y es capaz de experimentar el proceso de microcogeneración, es decir, de producir energía eléctrica (hasta 4,4 kW) y térmica al mismo tiempo. La potencia de esta caldera es ideal e incluso sobrada para el calentamiento de una vivienda de tamaño medio en España.
- BaxiRoca se encarga de fabricar calderas de microcogeneración con el fin de producir energía eléctrica y térmica al mismo tiempo que pueden ser:
 - o Caldera Stirling Motor Company = Caldera con motor de combustión externa que emplea el helio como gas de trabajo utilizado.
 - o Caldera CHP de motor interno = Caldera que funciona mediante el accionamiento de una turbina conectada al generador eléctrico encargado de producir electricidad.

- Caldera de Fuel Cell CHP = Caldera que posee una celda de combustible encargada de convertir la energía química de forma directa en corriente eléctrica maximizando así la eficiencia.
- BAXI fabrica equipos de microgeneración denominados “Dachs”, ideales para satisfacer las necesidades energéticas para calefacción, agua caliente sanitaria y electricidad de diferentes instalaciones como pueden ser las viviendas. Sin embargo, estos equipos se encuentran alimentados con gas y no valoran la posibilidad de que sean alimentados con biomasa como la cáscara de pistacho.

5.3.2.2. Equipos de combustión domésticos sin cogeneración

Las calderas domésticas policombustible que no experimentan el proceso de microgeneración y poseen como mínimo una potencia de 15 kW existentes en el mercado, es decir, las ideales para calentar una vivienda de tamaño medio, se encuentran nombradas y detalladas a continuación.

- Caldera de biomasa Domusa BioClass HM16 OD = Su potencia es de 15,6 kW; se encuentra alimentada con pellet, hueso de aceituna o cáscara de pistacho entre otros; su precio es de 4.962 € sin considerar la instalación de las infraestructuras oportunas; y se emplea para calefacción, pero con opción a ser capaz de dotar de agua caliente sanitaria.
- Caldera policombustible SFL 3 = Su potencia es de 22 kW; se encuentra alimentada con pellet, leña o carbón; su precio es de 2.920 €; y se emplea únicamente para calefacción.
- Caldera policombustible SFL 4 = Su potencia es de 30 kW; se encuentra alimentada con pellet, leña o carbón; su precio es de 3.284 €; y se emplea únicamente para calefacción.
- Caldera policombustible SFL 6 = Su potencia es de 42 kW; se encuentra alimentada con pellet, leña o carbón; su precio es de 4.008 €; y se emplea únicamente para calefacción.

Anteriormente, se recogen las características más importantes de cada modelo a tener en cuenta a la hora de elegir la caldera más adecuada:

- La potencia que hace referencia a la cantidad de calor que genera y se encuentra relacionada con la superficie a calentar.
- El tipo de combustible por el que se alimenta la caldera que puede ser pellet, leña o carbón que son los más comunes y otros alternativos más sostenibles como el hueso de aceituna, la cáscara de almendra o la cáscara de pistacho.
- El precio que cuesta cada modelo de caldera.
- El uso al que se encuentra destinada la caldera que o bien puede ser únicamente para calefacción o para la obtención de agua caliente sanitaria o bien para ambos usos.

5.4. Ingeniería del Proceso

La cáscara de pistacho es un residuo rígido procedente de este fruto cuya forma puede suponer problemas a la hora de alimentar los diferentes equipos de combustión. Para solucionarlo, se valoran las distintas alternativas de incorporación de la cáscara a las calderas tal y como se comenta a continuación.

5.4.1. Peletizado

El peletizado es un método por el que un material, como puede ser la madera o en este caso, la cáscara de pistacho, previamente astillado es comprimido reduciendo así su humedad y convirtiéndolo en forma de gránulo o pellet.

Durante este proceso, la biomasa experimenta diversas fases:

- Preparación = La biomasa es cribada eliminando partículas de gran tamaño como las piedras y experimenta una primera molienda empleando un molino de martillos para su homogeneización. Posteriormente, es almacenada en los Centros de Recogida y Almacenamiento de Biomasa (CREB) hasta que pasa a la siguiente fase.
- Secado = Se reduce la humedad de la biomasa molida a un 10-15% empleando un secadero tipo tromel como se muestra en la Figura 17. Este tipo de secadero consta de un cilindro de determinada longitud y diámetro que gira sobre unas ruedas motrices. Esta fase es muy importante dado que el agua actúa como un agente ligante por lo que un exceso de humedad de la biomasa da lugar a un pellet de baja calidad además de suponer un mayor desgaste para las piezas que conforman la peletizadora.



Figura 17. Secadero del tipo tromel. Fuente: Rodríguez, 2016.

- Molienda = La biomasa seca es pasada por un vibrotamizador que presenta dos mallas: una de 6 mm por la que pasa el material que va a ser almacenado en un silo; y, otra de 8 mm por la que los elementos que pasan van a experimentar posteriormente una segunda molienda a través de la malla de 6 mm para reducir sus dimensiones.
- Fabricación de los pellets mediante el paso de la biomasa seca ayudada por rodillos giratorios a través de una matriz que provocan la extrusión de la misma generando su compactación. Se pueden fabricar empleando peletizadoras de matriz plana o peletizadoras de matriz anular o cilíndrica. Se pueden añadir aditivos, pero suponen diversos inconvenientes para los quemadores de calderas de biomasa.
- Enfriado y extracción de finos = Se reduce la temperatura de los pellets ya producidos empleando enfriadores de cinta ocurriendo dos procedimientos físicos, primero la convección y, posteriormente, la evaporación. Esta fase es necesaria debido a que la temperatura de los pellets al salir de la matriz se encuentra entre los 90 y los 100 °C. Previamente a su embalaje, es necesario extraer los finos empleando cribas planas vibratorias.
- Empaquetado = Los pellets son envasados para su distribución a granel, en “big-bags” con capacidad de entre 0,5 y 2 m³, y, en bolsas pequeñas de entre 5 y 25 kg.

El proceso del peletizado de la biomasa se representa gráficamente en la Figura 18.



Figura 18. Proceso del peletizado de la biomasa. Fuente: Elaboración propia a partir de información incluida en Rodríguez, J. (2019).

El coste del peletizado depende de la cantidad de biomasa necesaria para producir 1 t de pellets. Los pellets como hemos explicado anteriormente, se fabrican a partir de la compresión de biomasa molida.

Según el artículo (TCPEL, 2022), la cantidad de molienda necesaria para la fabricación de 1 t de pellets depende de tres factores principales: contenido en humedad, pureza y tipo de peletizadora empleada.

- Contenido en humedad = Una humedad elevada implica una menor producción de pellets porque el agua presenta un efecto ligante, por lo que la humedad ideal para el peletizado ronda entre un 10% y un 15%.
- Pureza de la molienda = A mayor pureza, mayor contenido en biomasa molida y, por tanto, mayor volumen de pellets producidos.
- Tipo de peletizadora = Cuanto mayor rendimiento tengan las peletizadoras, mayor producción de pellets tendrá lugar a partir de la molienda.

Por tanto, teniendo en cuenta que la humedad alcanza los valores adecuados en la fase del secado durante el proceso del peletizado, que se realizan exhaustivos cribados para que la pureza de la molienda sea lo más elevada posible y que se emplearía una peletizadora de alto rendimiento, serían necesarias 1,2 t de biomasa molida para producir 1 t de pellets.

Para estimar el coste que supondría el peletizado de la cáscara de pistacho incluyendo los beneficios que obtendrían los intermediarios, se va a realizar un cálculo del coste que supone producir 1 t de pellets mediante la estimación de la diferencia de precio que existe entre 1 t de astillas y 1 t de pellets fabricados con esas astillas.

Actualmente, según el artículo (Arnabat, 2022 junio 1), el precio de 1 t de astillas de madera de calidad estándar sería de 120,64 € y el precio de 1 t de pellets de calidad estándar distribuida en sacos de 15 kg ronda los 379 €. De esta forma, sabiendo que para producir 1

t de pellets se necesitan 1,2 t de astillas, el coste de las astillas requeridas para la producción de 1 t de pellets es:

$$120,64 \frac{\text{€}}{\text{t}} \times 1,2 \text{ t} = \mathbf{144,77 \text{ €}}$$

Conociendo este valor, el coste la producción de 1 t y 1 kilo de pellets es de:

$$379 \frac{\text{€}}{\text{t}} - 144,77 \frac{\text{€}}{\text{t}} = \mathbf{234,23 \frac{\text{€}}{\text{t}}} = \mathbf{0,234 \text{ €/kg}}$$

Por tanto, el porcentaje que supone el coste del peletizado con respecto al coste inicial de las astillas es el siguiente:

$$\frac{379 \text{ €} - 144,77 \text{ €}}{379 \text{ €}} \times 100 = \mathbf{62\%}$$

Mediante estos cálculos, se observa que el proceso del peletizado supone un aumento del coste en un 62%.

Si estos valores los aplicamos al caso concreto de la cáscara de pistacho los costes finales serían los detallados a continuación.

Según los datos de la procesadora “Agroforestales Esla” (Villalpando) donde tiene lugar el procesado de la producción de pistacho objeto de este estudio, la cáscara de pistacho que se obtiene se vendería a unos 0,21 €/kg.

Si esta cáscara experimentase el procesado del peletizado, aumentaría su precio en 0,24 €/kg tal como se ha calculado anteriormente por lo que el precio de la cáscara de pistacho peletizada por t y por kilo sería de:

$$0,21 \frac{\text{€}}{\text{kg}} (\text{Cáscara de Pistacho}) + 0,24 \frac{\text{€}}{\text{kg}} (\text{Peletizado}) = \mathbf{0,45 \frac{\text{€}}{\text{kg}}} = \mathbf{450 \text{ €/t}}$$

5.4.2. Trituración

La trituración es un método por el que se produce la reducción del tamaño de las partículas de la materia prima a moler sin llegar a producir polvo, siendo en este caso la cáscara de pistacho. Existen diferentes técnicas y equipos encargados de llevar a cabo esta función.

Los diferentes métodos empleados para la trituración son:

- Impacto = La materia prima es fracturada mediante la energía de un impacto o golpe fuerte.
- Molienda = Esta técnica consiste en varios triturados de partículas de tamaños variados que, posteriormente, experimentan un tamizado para que sean separadas según su diámetro.
- Abrasión = La biomasa experimenta una reducción de su tamaño mediante la fricción.
- Desgaste = La biomasa pierde parte del material que la conforma debido a la acción de una fuerza sobre esa superficie que se va a perder.

Los principales equipos encargados de reducir el tamaño de la biomasa son:

- Astilladoras = Presentan unas cuchillas responsables de dividir la biomasa en piezas más pequeñas bastante regulares con prácticamente inapreciable diferencia entre la dimensión mayor y menor de las mismas.
- Trituradoras y amoladoras = Estos aparatos son responsables de fragmentar la biomasa en elementos más grandes que en el caso de las astilladoras siendo su longitud bastante mayor que cualquiera de sus medidas transversales.

- Trituradoras de mandíbula = Estas trituradoras son de las más actuales que existen y presentan unas mandíbulas o palas responsables de llevar a cabo el triturado de la biomasa. Son ideales para el triturado de materiales duros por lo que son bastante empleadas en la minería y en la construcción.
- Trituradoras de cono = Se encargan de reducir el tamaño de las partículas que conforman materiales de gran dureza.
- Trituradoras de impacto = Son ideales para el procesado de materiales procedentes de la industria minera.
- Molinos = Los molinos consiguen la fragmentación de la biomasa mediante un rápido impacto sobre las partículas que la conforman y las diferentes partes experimentan un tamizado final.
 - Molinos verticales = Son máquinas de larga vida útil y resistentes que resultan ser modelos sostenibles y respetuosos con el medio ambiente.
 - Molinos de martillos = Molinos encargados de desintegrar la biomasa mediante un conjunto de golpes de martillo que tienen la función de moler y aplastar estos materiales.
- Aplastadoras = Las partículas de la biomasa son fracturadas mediante un proceso de compresión lento.

5.4.3. Ausencia de Procesado

El último estado en el que se puede incorporar la cáscara de pistacho es en ausencia de procesado, es decir, sin experimentar un peletizado o triturado.

A nivel económico sería la opción más rentable porque es la única alternativa que no supone ningún coste a mayores del de la propia materia prima. Sin embargo, la incorporación de la cáscara de pistacho de forma natural en los equipos de combustión puede provocar la generación de diversos problemas como el atascamiento de los mismos debido a la forma irregular del combustible, así como a la falta de homogeneidad del mismo.

6.DETERMINACIÓN DE ALTERNATIVAS.

6.1. Elección del Tipo de Biomasa

Existen diferentes tipos de alternativas de biomasa posibles para emplear como alimentación de una caldera y entre ellos se han considerado para este estudio la cáscara de pistacho, la cáscara de avellana, la cáscara de castaña, la cáscara de almendra, el hueso de aceituna y los pellets. Para poder llevar a cabo un análisis comparativo relevante de las diferentes alternativas, se elabora la Tabla 13 que recoge las principales características de cada una detalladas en apartados anteriores.

Tabla 13. Tabla comparativa de las características de cada tipo de biomasa. Fuente: Elaboración propia a partir de fuentes referidas en el A. I y datos experimentales para pistacho.

TIPO DE BIOMASA		HUMEDAD (%)	RESIDUO (%)	PODER CALORÍFICO (kcal/kg)
Cáscara de Pistacho	Calibre Grande	7,00	25	4.601,05
	Calibre Pequeño	7,00	66	4.601,05
Cáscara de Pistacho Plantación		7,62	25	6.051,12
Cáscara de Avellana		12,00	71	4.160,61
Cáscara de Castaña		-	10	-
Cáscara de Almendra		14,20	75	4.780,22
Hueso de Aceituna		31,00	15	4.500,00
Pellets		9,50	-	4.180,00

El combustible calorífico ideal sería aquel que cumpliera con las siguientes condiciones: presentase una humedad inferior al 20% para que no tuviese que experimentar ningún proceso de secado lo que supondría un aumento de los costes; el porcentaje de residuo obtenido con respecto a la producción fuese de un valor elevado porque eso significaría que generaría una gran cantidad de biomasa para ser aprovechado como combustible, aunque esto podría suponer una baja rentabilidad del producto.

Por tanto, y atendiendo a la Tabla 13, los tipos de biomasa ideales serían la cáscara de pistacho de la plantación objeto de este estudio debido a su elevado poder calorífico y a su reducido valor del contenido en la humedad, y, la cáscara de almendra dado que después de la de pistacho es la que mayor poder calorífico presenta del resto de tipos de biomasa considerados además de poseer un reducido contenido en humedad, aunque algo superior al de la cáscara de almendra.

El hueso de aceituna también es considerado un combustible calorífico adecuado debido a su alto poder calorífico, pero debe experimentar un proceso de secado previo a su empleo implicando un coste adicional. Por este motivo, esta alternativa es descartada automáticamente.

Con todos estos datos, la conclusión es que, atendiendo a las características más importantes a tener en cuenta para la combustión de la biomasa, la cáscara de pistacho y en particular la procedente de la plantación ubicada en Perales, se trata de un combustible calorífico ideal. El siguiente paso sería evaluar si sería rentable económicamente.

Finalmente, para el empleo de la cáscara de pistacho como combustible, es recomendable que experimente un triturado previo a su uso mediante un molino triturador para reducir y homogeneizar su tamaño de tal forma que sea más sencillo su empleo como biomasa. En el caso de los pistachos vanos experimentan el proceso del secado al igual que el resto de la producción por lo que deberán experimentar el mismo proceso de triturado que la cáscara.

6.2. Elección del Equipo de Combustión

6.2.1. Elección del equipo de combustión a nivel industrial con cogeneración

Los posibles equipos de combustión industriales a emplear que tienen la capacidad de experimentar el proceso de cogeneración se recogen en la Tabla 14.

Tabla 14. Equipos de combustión industriales con cogeneración. Fuente: Elaboración propia.

FABRICANTE	MODELO	TIPO	POTENCIA	DISPOSICIÓN	CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS
Kohlbach	-	-	3.300 – 12.000 kW	-	Alimentación por turbina ORC Funcionamiento continuo durante un largo período de tiempo
Calderería López Hermanos S.A.	CRP	Pirotubular	-	-	Posibilidad de incorporar el economizador y precalentador
	CRM	Pirotubular	-	Horizontal	Posibilidad de incorporar el economizador
	CRA	Acuotubular	-	Horizontal	Posibilidad de incorporar el economizador y precalentador
ERK	-	-	-	-	Equipos individualizados Policombustible

Como se ha explicado anteriormente, la diferencia entre las calderas acuotubulares y pirotubulares es que en las primeras los gases de combustión viajan por el exterior de los tubos mientras que en las segundas circulan por el interior de los mismos.

Las calderas acuotubulares son mejores en el caso de que se requiera una mayor capacidad térmica, eficiencia y seguridad en condiciones de presiones elevadas. Sin embargo, las calderas pirotubulares destacan por poseer un mejor rendimiento y ser más sencillas de operar.

Además, la disposición horizontal de las calderas se caracteriza por facilitar las labores de mantenimiento, y, en especial del quemador, que queda a una altura a la que se alcanza perfectamente sin necesidad de emplear medios auxiliares como escaleras o plataformas para trabajos en altura.

También es importante conocer qué son un economizador y un precalentador. Un economizador es un simple dispositivo con una gran eficiencia que se encarga de absorber la energía en forma de calor procedente del gas de combustión de la caldera y es transferida al agua. Sin embargo, un precalentador es el responsable de intercambiar calor aprovechando los gases de escape de la combustión con el fin de aumentar la temperatura del agua de alimentación del generador de vapor que atraviesa el interior del tubo de este generador.

Los guiones tanto en la tabla anterior como en las posteriores que se encargan de comparar los diferentes equipos de combustión, hacen referencia al desconocimiento de los datos a los que se refieren.

Atendiendo a la tabla anterior y teniendo en cuenta cada una de las características descritas anteriormente, dentro de los diferentes fabricantes y los distintos modelos existentes, el equipo de combustión más adecuado sería el generado por ERK dado que dispone de equipos individualizados y puede ser alimentado mediante una diversidad de combustibles, es decir, son equipos de combustión policombustible. Por tanto, podrían abastecerse empleando la cáscara de pistacho.

Para conocer el precio de estos equipos de combustión, así como sus características concretas, sería necesario saber la potencia adecuada para satisfacer las necesidades de la actividad donde se van a emplear estos equipos. Por este motivo, también ERK es la mejor opción dado que se adapta a las condiciones impuestas por el cliente.

6.2.2. Elección del equipo de combustión a nivel industrial sin cogeneración

En el caso de los equipos de combustión industriales que no experimentan el proceso de cogeneración, las distintas opciones se encuentran recogidas en la Tabla 15.

Tabla 15. Equipos de combustión industriales sin cogeneración. Fuente: Elaboración propia.

FABRICANTE	MODELO	TIPO	DISPOSICIÓN	HOGAR	CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS
Kohlbach	-	-	-	-	Potencia = 400 – 15.000 kW Presión = 0,5 – 40 bar Turbina o motor de vapor
Calderería López Hermanos S.A.	GVL-H	Pirotubular	Horizontal	Hogar interior centrado	Combustión completa dentro del hogar El humo invierte el sentido de circulación
	CBC	Pirotubular	-	Hogar horizontal centrado	Combustión completa dentro del hogar El humo retorna al hogar
	CIT	Acuotubular	En delta	-	Tabiquería externa refractaria Tres pasos de humos
ERK	-	Pirotubular	-	-	Compactas Bajo coste Los gases atraviesan el horno y varios tubos

Las calderas con configuración en delta son principalmente empleadas para la generación de agua caliente sanitaria con un alto rendimiento y empleando un sistema de calentamiento indirecto.

El significado del resto de características como el de los diferentes tipos de calderas o la disposición en horizontal de las mismas se ha explicado en el apartado anterior.

Por tanto, teniendo en cuenta la Tabla 15, el equipo de combustión industrial que no experimenta el proceso de cogeneración más oportuno sería el fabricado por ERK dado que

se trata de un equipo compacto, pero de bajo coste además de adaptarse a las necesidades de la actividad para la que se requiera. Es de tipo pirotubular siendo así más sencillo de manejar y con un rendimiento elevado.

Para conocer el precio exacto de estos equipos de combustión, así como sus características concretas, sería necesario saber la potencia adecuada para satisfacer las necesidades de la actividad donde se van a emplear estos equipos.

6.2.3. Elección del equipo de combustión doméstico con cogeneración

Los equipos de combustión domésticos que presentan cogeneración se encuentran recogidos para realizar una comparativa en la Tabla 16.

Tabla 16. Equipos de combustión domésticos con cogeneración. Fuente: Elaboración propia.

FABRICANTE	MODELO	CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS
ENERGYLAB	-	Policombustible Potencia = 60 kW Agua caliente hasta T = 90 °C
BaxiRoca	Stirling Motor Company	Motor de combustión externa Helio como gas de trabajo
	CHP de motor interno	Turbina conectada a un generador eléctrico
	Fuel Cell CHP	Celda de combustible = Conversión directa de energía química a energía eléctrica
BAXI	-	Satisfacción de necesidades energéticas para calefacción, agua caliente sanitaria y electricidad

Según la Tabla 16, el equipo de combustión doméstico más adecuado para el calentamiento de una casa en la que como hemos supuesto anteriormente se necesitaría una potencia de 15 kW, sería el diseñado por ENERGYLAB.

Esto se debe a que la caldera diseñada por este fabricante es policombustible, es decir, puede alimentarse empleando diferentes tipos de combustible entre los que se encontraría la cáscara de pistacho. Además, presenta una potencia de 60 kW, satisfaciendo sobradamente las necesidades requeridas y a mayores, es capaz de aportar agua caliente sanitaria con una temperatura de hasta 90 °C.

También es importante tener en cuenta que ENERGYLAB es un fabricante español, por lo que dispondrá de un mayor servicio técnico que otros fabricantes en nuestro país y resulta interesante apoyar a las empresas españolas.

6.2.4. Elección del equipo de combustión doméstico sin cogeneración

Las características principales de los posibles modelos de calderas domésticas policombustible que no experimentan el proceso de cogeneración adecuadas para el tamaño de la vivienda que se ha considerado en este estudio se encuentran detalladas en la Tabla 17.

Prestando atención a la tabla siguiente y valorando todas las características de cada modelo de equipo de combustión y las necesidades requeridas, el modelo de caldera más adecuado sería el "Domusa BioClass HM16 OD" dado que, a pesar de su precio más elevado en comparación al resto, la potencia que posee es la ideal siendo de 15,6 kW ya que se necesita una potencia aproximada de unos 15 kW.

Además, el uso de este modelo es principalmente para calefacción con opción a dotar de agua caliente sanitaria a la vivienda mientras que el resto de modelos únicamente pueden ser utilizados para la calefacción.

También es importante tener en cuenta que este modelo se encuentra preparado para el empleo de cualquier combustible además de la leña, el carbón o los pellets como pueden ser el hueso de aceituna o la cáscara de pistacho entre otros. Sin embargo, los otros modelos de calderas únicamente pueden alimentarse con leña, carbón o pellets a los que tendrían que incorporarse determinados acoples para que se pudiesen emplear combustibles como la cáscara de pistacho.

Tabla 17. Características principales de las calderas domésticas policombustible existentes en el mercado. Fuente: Elaboración propia.

MODELO DE CALDERA	POTENCIA (kW)	TIPO DE COMBUSTIBLE	PRECIO (€)	USO
Domusa BioClass HM16 OD	15,6	Pellet, hueso de aceituna, cáscara de pistacho...	4.962	Calefacción con opción a agua caliente
SFL 3	22	Pellet, leña, carbón...	2.920	Calefacción
SFL 4	30	Pellet, leña, carbón...	3.284	Calefacción
SFL 6	42	Pellet, leña, carbón...	4.008	Calefacción

6.3. Elección de la Ingeniería del Proceso

La cáscara de pistacho es un residuo que puede ser empleado para la alimentación de diversos equipos de combustión, pero para ello puede incorporarse en diferentes estados como se ha detallado en el estudio de alternativas de la “Ingeniería del Proceso”.

Todos los procesos han sido correctamente definidos excepto el de trituración cuya opción más adecuada es empleando un procesado de triturado de impacto dado el material tratado. Para ello, se va a emplear un molino de martillos encargado de moler y aplastar el material en cuestión.

El coste del triturado empleando un molino de martillos según (Generador de Precios CYPE. España) es de 0,97 €/m³, que expresado en €/kg:

$$0,97 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ m}^3}{280 \text{ kg}} = 0,0035 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$$

Para ello, se ha considerado que la cáscara de pistacho presenta por término medio según (AgroBioHeat, 2015) una densidad de 280 kg/m³.

El coste del triturado en €/t es de:

$$0,0035 \text{ €/kg} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ t}} = 3,50 \text{ €/t}$$

Por tanto, el precio de la cáscara de pistacho que experimente el proceso del triturado es de:

$$0,21 \frac{\text{€}}{\text{kg}} (\text{Cáscara Pistacho}) + 0,0035 \frac{\text{€}}{\text{kg}} (\text{Triturado}) = 0,2135 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = 213,5 \text{ €/t}$$

Una vez conocido el coste del triturado, se puede llevar a cabo una comparativa de los distintos procesados posibles de la cáscara de pistacho responsable de alimentar los equipos de combustión. Las características principales de estas alternativas se encuentran recogidas en la Tabla 18.

Tabla 18. Análisis comparativo de las posibles alternativas del procesado de la cáscara de pistacho para su incorporación como combustible. Fuente: Elaboración propia.

PROCESO	COSTE	VENTAJAS	INCONVENIENTES
Peletizado	0,45 €/kg = 450 €/t	Homogeneidad del combustible	Coste elevado y mayor tiempo necesario para su producción
Triturado	0,0035 €/kg = 3,50 €/t	Homogeneidad del combustible Coste bajo	Tiempo intermedio necesario para su producción
Ausencia de Procesado	0 €/kg = 0 €/t	Coste nulo	Irregularidad del combustible lo que puede provocar atascamientos

Atendiendo a los detalles de la tabla anterior, el proceso del peletizado de la cáscara de pistacho se trata de un método cuyo coste es bastante elevado, aunque logra que el combustible sea homogéneo. La ausencia de procesado supone un coste nulo pero el combustible continúa siendo irregular pudiendo atascar y ocasionar desperfectos en los equipos de combustión.

Por todos estos motivos, el triturado de la cáscara de pistacho empleando un molino de martillos es el método más adecuado dado que presenta un coste mucho menor que el peletizado y logra que el combustible encargado de alimentar las calderas posea una alta homogeneidad evitando posibles atascos de las mismas.

7.ESTUDIO ECONÓMICO.

7.1. Rendimientos de la plantación de pistacho ubicada en Perales

La plantación de pistacho de la variedad “Kerman” ubicada en el término municipal de Perales en la provincia de Palencia que se encuentra en el polígono 4 en las parcelas desde la 5038 a la 5042 presenta una superficie total de 16,40 ha. La producción obtenida en la última campaña en esta plantación ha sido de 6.963 kg, es decir, de 424,56 kg/ha.

La producción se divide en un porcentaje de pistachos vanos, en otro de pistachos destinados a la venta directa y en un último de pistachos que van a experimentar el cascado tal como se recogía en la Tabla 10.

De esta forma, los 6.963 kg se dividen en:

- Pistachos vanos = 1.044 kg
- Pistachos destinados a venta directa = 4.735 kg
- Pistachos destinados al cascado = 1.184 kg
 - o Cáscara de pistacho = 696 kg
 - o Grano de pistacho = 488 kg

Teniendo en cuenta que, tanto la cáscara como los pistachos vanos son tratados como residuo, se han obtenido en la última campaña en esta plantación un total de 1.740 kg de residuo.

El precio del pistacho de la variedad “Kerman” según la Lonja Agropecuaria de La Mancha (AgroCLM, 2022) es el siguiente dependiendo del calibre del mismo:

- Calibre 18-20 = 7,80 €/kg
- Calibre 20-22 = 7,45 €/kg
- Calibre 23-25 = 7,20 €/kg

El precio del grano de pistacho está a 10 €/kg y en el caso del pistacho cerrado, manchado o de cáscara irregular se encuentra a 4,50 €/kg.

Es importante tener en cuenta que el procesado del pistacho tiene un coste de entre 1 €/kg y 2,50 €/kg dependiendo de la procesadora donde tenga lugar, dependiendo de la modernidad de su maquinaria además de la efectividad del procesado según la experiencia del productor de la plantación de pistachos ubicada en el término municipal de Perales.

Teniendo en cuenta estos precios, en el caso de la plantación objeto de estudio, se ha vendido toda la producción sin haber sido calibrada por lo que está obteniendo un rendimiento de un precio medio de:

$$\text{Precio Medio Pistacho} = \frac{7,80 \frac{\text{€}}{\text{kg}} + 7,45 \frac{\text{€}}{\text{kg}} + 7,20 \frac{\text{€}}{\text{kg}}}{3} = 7,48 \text{ €/kg}$$

Como la producción total en la última campaña ha sido de 6.963 kg, y teniendo en cuenta que aproximadamente un 8% se corresponde con pistacho manchado o de cáscara irregular, es decir, 557 kg, el importe recibido por parte del productor es de:

$$\text{Rendimiento Plantación} = 6.406 \text{ kg} \times 7,48 \frac{\text{€}}{\text{kg}} + 557 \text{ kg} \times 4,50 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = 50.423,38 \text{ €}$$

El procesado supone un coste de entre 1 €/kg y 2,50 €/kg, dependiendo de la procesadora, por lo que, el precio medio del procesado es de unos 1,75 €/kg. De esta forma, los gastos en el procesado en esta plantación son:

$$\text{Gastos Procesado} = 6.963 \text{ kg} \times 1,75 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = 12.185,25 \text{ €}$$

Teniendo en cuenta los datos anteriores, el importe neto que ingresa el productor de esta plantación en esta campaña por la venta del pistacho es de:

$$50.423,38 \text{ € (Ingreso por Venta)} - 12.185,25 \text{ €(Procesado Pistacho)} = \mathbf{38.238,13 \text{ €}}$$

El beneficio del productor sería la diferencia entre este ingreso neto por la venta del producto y los costes de producción, como el abonado, el riego o la recolección.

Actualmente, no se recibe ningún beneficio por parte del productor proveniente de los pistachos vanos o de la cáscara de pistacho. Por este motivo, atendiendo a su poder calorífico y para poder reutilizar estos residuos, se valora en este estudio la posibilidad de que sean empleados como combustible para producir energía en forma de calor. De esta forma, los kg correspondientes a la cáscara de pistacho y a los pistachos vanos serán primeramente triturados empleando un molino de martillos con el objetivo de homogeneizar y facilitar su empleo en las calderas. Posteriormente, su uso tendría lugar o bien para alimentar calderas domésticas o bien para su combustión en la propia procesadora.

Siendo el destino final de este tipo de biomasa cualquiera de los anteriores mencionados, el productor recibirá una cantidad de dinero por cada cantidad de la misma. Según las estimaciones que se realizan por alternativas de biomasa similares y por los posibles costes de producción, el coste por kilo de la cáscara de pistacho y de los pistachos vanos rondaría los 0,21 €/kilo o 210 €/t.

Por tanto, teniendo en cuenta que en la última campaña se obtuvieron 1.740 kg de residuos, el beneficio que se obtendría por la venta de este tipo de biomasa será de:

$$\text{Beneficio Cáscara de Pistacho} = 1.740 \text{ kg} \times \frac{0,21 \text{ €}}{\text{kilo}} = \mathbf{365,4 \text{ €}}$$

Quizás no se trata de un beneficio excesivamente elevado, pero supone un ingreso que extrapolado a varias campañas o a producciones mayores se considera importante y ayuda a sufragar los costes de producción al productor.

Por tanto, el residuo tendría de cualquier forma salida o bien siendo aprovechado directamente por la procesadora encargada de abonar el importe de los kg de residuo producidos por el productor o bien siendo vendida a clientes que posean calderas domésticas similares a los modelos anteriormente mencionados. En ambos casos, deberán experimentar un triturado previo mediante un molino de martillos.

7.2. Rendimientos de los consumidores

Los consumidores actualmente poseen un gran desafío a la hora de calentar sus casas, así como de alimentar los equipos de combustión necesarios para procesos como el secado debido al aumento de los costes de las materias primas. La cáscara de pistacho podría ser un tipo de biomasa económico permitiendo así la reutilización de este residuo y darle una salida sostenible.

A continuación, se recogen los costes que supondría alimentar una caldera por kW de potencia. Además, estos costes se van a extrapolar a la caldera de potencia de 15,6 kW seleccionada como equipo de combustión doméstico sin cogeneración y a la caldera de potencia de 60 kW como equipo de combustión doméstico con cogeneración.

7.2.1. Cáscara de pistacho

La cáscara de pistacho como hemos comentado anteriormente presenta un coste aproximado de unos 0,21 €/kg y un poder calorífico de 4.601,05 kcal/kg según la bibliografía y de 6.051,12 kcal/kg en el caso de la cáscara de la plantación objeto de este estudio.

También habrá que tener en cuenta si la cáscara de pistacho es empleada sin haber experimentado ningún procesado previo, o si ha sido triturada o peletizada. Para ello, como se ha comentado anteriormente, es importante saber que el precio de la cáscara de pistacho triturada es de 0,2135 €/kg y el de la cáscara de pistacho peletizada es de 0,45 €/kg.

Sabiendo que 1 kW de potencia equivale a la necesidad de quemado de 859,95 kcal/h, las necesidades de quemado por hora de los dos tipos de calderas que se van a usar como ejemplo se recogen en la Tabla 19.

Tabla 19. Necesidades de quemado de los equipos de combustión dependiendo de su potencia. Fuente: Elaboración propia.

POTENCIA (kW)	kcal/h · 1 kW	kcal/h
15,6	859,95	13.415,22
60	859,95	51.597,00

Sabiendo las necesidades de quemado por kW de potencia y en el caso de cada equipo de combustión, hay que calcular los kg de cáscara de pistacho que serían necesarios para alimentar estos equipos de combustión por hora dependiendo de su poder calorífico.

Para el caso de la cáscara de pistacho general (CPG), la cantidad de biomasa necesaria para 1 kW de potencia se calculará empleando el poder calorífico de la bibliografía:

$$859,95 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ kg CPG}}{4.601,05 \text{ kcal}} = \mathbf{0,19 \text{ kg/h}}$$

Sin embargo, en el caso particular de la cáscara de pistacho de la plantación (CPP) de Perales será de:

$$859,95 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ kg CPP}}{6.051,12 \text{ kcal}} = \mathbf{0,14 \text{ kg/h}}$$

La cantidad de biomasa necesaria para la alimentación de los equipos de combustión es la misma tanto para la cáscara de pistacho que no haya experimentado ningún procesado como para que la que haya sido triturada o peletizada debido a que el poder calorífico continúa siendo el mismo.

Por tanto, conociendo la biomasa necesaria para 1 kW de potencia, la que alimentará los otros dos tipos de calderas por hora distinguiendo entre la cáscara de pistacho general y la cáscara de pistacho de la plantación se recoge en la Tabla 20.

Tabla 20. Cantidad de cáscara de pistacho necesaria por hora para la alimentación de los diferentes equipos de combustión. Fuente: Elaboración propia.

POTENCIA (kW)	kg/h · 1 kW		kg/h	
	CPG	CPP	CPG	CPP
15,6	0,19	0,14	2,92	2,18
60	0,19	0,14	11,21	8,40

Atendiendo a los datos de la tabla anterior, el coste de alimentación por hora por cada kW de potencia será el producto entre el coste de la biomasa por kilo y el número de kg necesarios por hora. En el caso de la cáscara de pistacho general, los tres diferentes costes serán los siguientes:

$$\text{Coste Alimentación CPG} = 0,19 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ CPG} \times 0,21 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = \mathbf{0,04 \frac{\text{€}}{\text{h}}}$$

$$\text{Coste Alimentación CPG Peletizada} = 0,19 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ CPG} \times 0,45 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = \mathbf{0,085 \frac{\text{€}}{\text{h}}}$$

$$\text{Coste Alimentación CPG Triturada} = 0,19 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ CPG} \times 0,2135 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = \mathbf{0,041 \frac{\text{€}}{\text{h}}}$$

Y, en el caso de la cáscara de pistacho de la plantación:

$$\text{Coste Alimentación CPP} = 0,14 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ CPP} \times 0,21 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = \mathbf{0,03 \frac{\text{€}}{\text{h}}}$$

$$\text{Coste Alimentación CPP Peletizada} = 0,14 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ CPP} \times 0,45 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = \mathbf{0,063 \text{ €/h}}$$

$$\text{Coste Alimentación CPP Triturada} = 0,14 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ CPP} \times 0,2135 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = \mathbf{0,03 \text{ €/h}}$$

Los costes para las calderas seleccionadas anteriormente se calculan a partir de los valores obtenidos anteriormente por kW de potencia y se encuentran recogidos en la Tabla 21.

Tabla 21. Coste de alimentación de los equipos de combustión por hora empleando cáscara de pistacho. Fuente: Elaboración propia.

POTENCIA (kW)	€/h · 1 kW						€/h					
	CPG			CPP			CPG			CPP		
	Aus	Pel	Tri	Aus	Pel	Tri	Aus	Pel	Tri	Aus	Pel	Tri
15,6	0,04	0,085	0,041	0,03	0,063	0,03	0,62	1,33	0,64	0,47	0,98	0,47
60	0,04	0,085	0,041	0,03	0,063	0,03	2,40	5,10	2,46	1,80	3,78	1,80

En la tabla anterior:

- CPG = Cáscara de Pistacho General
- CPP = Cáscara de Pistacho Plantación
- Aus = Ausencia de Procesado
- Pel = Peletizado
- Tri = Triturado

7.2.2. Cáscara de avellana

La cáscara de avellana posee un poder calorífico de 4.610,61 kcal/kg, pero su precio es desconocido porque no existe ni un interés ni se ha planteado la posibilidad de su venta.

Las necesidades de quemado de los equipos de combustión tanto por kW como en el caso de los equipos de combustión domésticos seleccionados como ejemplos se muestran en la Tabla 19.

Sabiendo las necesidades de quemado dependiendo de la potencia, es necesario calcular los kg de cáscara de avellana (CAV) que serían necesarios para alimentar estos equipos de combustión por hora dependiendo de su poder calorífico.

Por tanto, la cantidad de biomasa necesaria para alimentar 1 kW de potencia es:

$$859,95 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ kg CAV}}{4.610,61 \text{ kcal}} = \mathbf{0,19 \text{ kg/h}}$$

Por tanto, conociendo la biomasa necesaria para 1 kW de potencia, la que alimentará los otros dos tipos de calderas por hora se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22. Cantidad de cáscara de avellana necesaria por hora para la alimentación de los diferentes equipos de combustión. Fuente: Elaboración propia.

POTENCIA (kW)	kg/h · 1 kW	kg/h
15,6	0,19	2,96
60	0,19	11,40

Finalmente, el coste de la alimentación de los equipos de combustión de la cáscara de avellana no puede ser calculado debido al desconocimiento del valor del precio de la cáscara de avellana.

7.2.3. Cáscara de almendra

La cáscara de almendra posee un poder calorífico de 4.780,22 kcal/kg y según la experiencia de la procesadora “Agroforestales Esla” (Villalpando) es donde también se lleva a cabo el procesado de la almendra, el precio actual al que se vende la cáscara de almendra es de 0,19 €/kg.

Además, la cáscara de almendra se suele incorporar triturada para evitar como en el caso de la cáscara de pistacho posibles atascos y averías en los equipos de combustión. Por tanto, es importante conocer su precio que, según COALCE, una empresa distribuidora de diferentes tipos de biomasa en Castilla la Mancha, es de 7 € por un saco de 20 kg, es decir, de 0,35 €/kg.

Conociendo estos datos y las necesidades de quemado dependiendo de la potencia de las calderas recogidas en la Tabla 19, la cantidad de cáscara de almendra (CAL) necesaria para satisfacer estas necesidades es de:

$$859,95 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ kg CAL}}{4.780,22 \text{ kcal}} = \mathbf{0,18 \text{ kg/h}}$$

Empleando el dato anterior, la cantidad de cáscara de almendra necesaria para alimentar las calderas ejemplos se encuentra recogida en la Tabla 23.

Tabla 23. Cantidad de cáscara de almendra necesaria por hora para la alimentación de los diferentes equipos de combustión. Fuente: Elaboración propia.

POTENCIA (kW)	kg/h · 1 kW	kg/h
15,6	0,18	2,81
60	0,18	10,80

Una vez que se sabe la cantidad de biomasa que requiere la alimentación de 1 kW de potencia y de las calderas elegidas, es importante conocer el coste de alimentación con la cáscara de almendra (CAL) por unidad de potencia que es el siguiente:

$$\text{Coste Alimentación CAL} = 0,18 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ CAL} \times 0,19 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = \mathbf{0,034 \text{ €/h}}$$

El coste de alimentación en el caso de la cáscara de almendra triturada (CALT) se calcula a continuación:

$$\text{Coste Alimentación CALT} = 0,18 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ CALT} \times 0,35 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = \mathbf{0,063 \text{ €/h}}$$

Estos costes aplicados a las diferentes potencias de las calderas que se usan como ejemplo se encuentran recogidos en la Tabla 24.

Tabla 24. Coste de alimentación de los equipos de combustión por hora empleando cáscara de almendra. Fuente: Elaboración propia.

POTENCIA (kW)	€/h · 1 kW		€/h	
	CAL	CALT	CAL	CALT
15,6	0,034	0,063	0,53	0,98
60	0,034	0,063	2,04	3,78

7.2.4. Hueso de aceituna

El hueso de aceituna se trata de un combustible bastante bueno debido a su elevado poder calorífico y a que su combustión genera un bajo contenido de cenizas. Posee un poder calorífico de 4.500 kcal/kg y según (Arnabat, 2022), los precios del hueso de aceituna dependen del método de comercialización:

- Saco individual de 20 kg = 199,51 €/t = 0,20 €/kg
- Palet de sacos = 198,71 €/t = 0,20 €/kg
- Granel en volquete = 162,91 €/t = 0,16 €/kg
- Granel en camión cisterna = 181,01 €/t = 0,18 €/kg

Por tanto, el precio medio del hueso de aceituna es de:

$$\text{Precio Medio Hueso Aceituna} = \frac{0,20 \frac{\text{€}}{\text{kg}} + 0,20 \frac{\text{€}}{\text{kg}} + 0,16 \frac{\text{€}}{\text{kg}} + 0,18 \frac{\text{€}}{\text{kg}}}{4} = \mathbf{0,19 \text{ €/kg}}$$

Por tanto, teniendo en cuenta que 1 kW de potencia equivale a la necesidad de quemado de 859,95 kcal/h, y que las necesidades de quemado por hora de los dos tipos de calderas que se van a usar como ejemplo se recogen en la Tabla 19, el siguiente paso es calcular la cantidad de hueso de aceituna (HA) necesaria para alimentar los diferentes equipos de combustión:

$$859,95 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ kg HA}}{4.500 \text{ kcal}} = \mathbf{0,19 \text{ kg/h}}$$

Por tanto, conociendo la biomasa necesaria para la alimentación de 1 kW de potencia, la necesaria para los otros dos tipos de calderas por hora se muestra en la Tabla 25.

Tabla 25. Cantidad de hueso de aceituna necesaria por hora para la alimentación de los diferentes equipos de combustión. Fuente: Elaboración propia.

POTENCIA (kW)	kg/h · 1 kW	kg/h
15,6	0,19	2,96
60	0,19	11,40

Una vez conocida la cantidad de hueso de aceituna necesaria para alimentar las diferentes potencias de cada equipo de combustión, se calculará el coste:

$$\text{Coste Alimentación HA} = 0,19 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ HA} \times 0,19 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = \mathbf{0,036 \text{ €/h}}$$

Los costes para las calderas seleccionadas anteriormente se calculan a partir de los valores obtenidos anteriormente por kW de potencia y se encuentran recogidos en la Tabla 26.

Tabla 26. Coste de alimentación de los equipos de combustión por hora empleando hueso de aceituna. Fuente: Elaboración propia.

POTENCIA (kW)	€/h · 1 kW	€/h
15,6	0,036	0,56
60	0,036	2,16

7.2.5. Pellets

Los pellets, que son la alternativa de biomasa más utilizada, poseen un poder calorífico de 4.180 kcal/kg y su precio depende de la forma de comercialización. Según (Arnabat, 2023), los precios de los pellets están experimentando una bajada y son:

- Saco individual de 15 kg = 7,79 €/saco = 519,33 €/t = 0,52 €/kg
- Palet de sacos = 379,37 €/t = 0,38 €/kg
- Pellets a granel a volquete = 352,83 €/t = 0,35 €/kg
- Pellets a granel en cisterna = 370,58 €/t = 0,37 €/kg

Por tanto, el precio medio de los pellets por kilo y por t actualmente se calcula a continuación:

$$\text{Precio Medio Pellets} = \frac{0,52 \frac{\text{€}}{\text{kg}} + 0,38 \frac{\text{€}}{\text{kg}} + 0,35 \frac{\text{€}}{\text{kg}} + 0,37 \frac{\text{€}}{\text{kg}}}{4} = \mathbf{0,41 \text{ €/kg}}$$

Ahora, sabiendo que para 1 kW de potencia se necesita el quemado de 859,95 kcal/h, y que las necesidades de quemado por hora de los dos tipos de calderas que se van a usar como ejemplo se recogen en la Tabla 19, habrá que calcular la cantidad de pellets necesaria para alimentar los diferentes equipos de combustión:

$$859,95 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ kg Pellets}}{4.180 \text{ kcal}} = \mathbf{0,21 \text{ kg/h}}$$

Una vez conocida la biomasa necesaria para la alimentación de 1 kW de potencia, la necesaria en el caso de las potencias de las otras dos calderas ejemplos por hora se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27. Cantidad de pellets necesaria por hora para la alimentación de los diferentes equipos de combustión. Fuente: Elaboración propia.

POTENCIA (kW)	kg/h · 1 kW	kg/h
15,6	0,21	3,28
60	0,21	12,60

Por tanto, el coste de alimentación por hora por 1 kW de potencia empleando pellets será de:

$$\text{Coste Alimentación Pellets} = 0,21 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ Pellets} \times 0,41 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = \mathbf{0,086 \text{ €/h}}$$

Los costes de alimentación de los equipos de combustión seleccionados anteriormente se calculan a partir de los valores obtenidos anteriormente por kW de potencia y se encuentran recogidos en la Tabla 28.

Tabla 28. Coste de alimentación de los equipos de combustión empleando pellets.
Fuente: Elaboración propia.

POTENCIA (kW)	€/h · 1 kW	€/h
15,6	0,086	1,34
60	0,086	5,16

7.2.6. Resumen del rendimiento de los consumidores

Los consumidores presentan actualmente diversas alternativas de biomasa para alimentar los equipos de combustión que emplean para calentar sus hogares u obtener agua caliente sanitaria, así como para llevar a cabo diversos procesos como el secado.

Estas alternativas han sido detalladas a lo largo de este estudio y evaluadas económicamente recogiendo así sus rendimientos por kW de potencia y para el caso de los equipos de combustión ejemplos en la Tabla 29.

Tabla 29. Análisis comparativo económico de las diferentes alternativas de biomasa para alimentar los diferentes equipos de combustión. Fuente: Elaboración propia.

BIOMASA			kg/h · 1 kW	€/kg	€/h · 1 kW	€/h		
							15,6 kW	60 kW
CP	CPG	Aus	0,19	0,21	0,04	0,62	2,40	
		Pel	0,19	0,45	0,085	1,33	5,13	
		Tri	0,19	0,2135	0,041	0,63	2,43	
	CPP	Aus	0,14	0,21	0,029	0,46	1,76	
		Pel	0,14	0,45	0,063	0,98	3,78	
		Tri	0,14	0,2135	0,03	0,47	1,79	
CAV			0,19	-	-	-	-	
CC			-	-	-	-	-	
CAL	Aus		0,18	0,19	0,034	0,53	2,05	
	Tri		0,18	0,35	0,064	0,98	3,78	
HA			0,19	0,19	0,04	0,56	2,17	
PELLETS			0,21	0,41	0,086	1,34	5,17	

Las abreviaciones de la tabla anterior tienen el siguiente significado:

- CP = Cáscara de Pistacho
- CPG = Cáscara de Pistacho General
- CPP = Cáscara de Pistacho Plantación
- CAV = Cáscara de Avellana
- CC = Cáscara de Castaña
- CAL = Cáscara de Almendra
- HA = Hueso de Aceituna
- Aus = Ausencia de Procesado
- Pel = Peletizado
- Tri = Triturado

Como se puede observar en la Tabla 29, las alternativas de biomasa de las que se requiere una menor cantidad para satisfacer las necesidades de quemado de los diferentes equipos

de combustión son tanto la cáscara de pistacho y en especial la procedente de la plantación ubicada en Perales como la cáscara de almendra.

Además, las alternativas de biomasa más económicas, es decir las que presentan un menor precio por kilo son la cáscara de almendra que no ha experimentado ningún procesado seguida del hueso de aceituna y de la cáscara de pistacho en ausencia de procesado.

En el caso elegido como la alternativa de biomasa más óptima para la alimentación de cualquier equipo de combustión, es decir, el de la cáscara de pistacho procedente de la plantación ubicada en el término municipal de Perales que ha experimentado un proceso de triturado empleando el molino de martillos, la cantidad de kg necesarios por hora es de 0,14, el valor más pequeño en comparación al resto de opciones.

Además, el precio por unidad de masa (kilo) de este tipo de biomasa triturado mediante un molino de martillos es de 0,2135 €/kg, un valor intermedio más cercano al más económico.

Por todos estos motivos, la cáscara de pistacho triturada y en especial la producida en la plantación objeto de este estudio, es la alternativa ideal para alimentar cualquier equipo de combustión debido a su precio económico y a la reducida cantidad de biomasa necesaria para este fin debido a su alto poder calorífico.

8.CONCLUSIONES.

En el presente documento se ha investigado la viabilidad del aprovechamiento de la cáscara de pistacho para su uso como combustible calorífico. Esta cáscara de pistacho se ha obtenido en una plantación de la variedad "Kerman" ubicada en el término municipal de Perales (Palencia), con una superficie de 16,40 ha y una producción de 6.963 kg. El volumen de residuo generado ha sido de un 25% de la producción, 1.741 kg. En base a análisis realizados en ITAGRA.CT, este residuo tiene un poder calorífico de 6.051 kcal/kg y una humedad del 7,62%. Una vez caracterizado el residuo, se han analizado diferentes equipos de combustión, domésticos e industriales, con y sin cogeneración. En relación con el proceso de tratamiento, para evitar posibles atascos o desgastes de los equipos de combustión, se propone el triturado de la cáscara empleando un molino de martillos. Respecto al análisis económico, se estima que la cantidad necesaria de cáscara de pistacho por kW de potencia del equipo de combustión es de 0,19 kg y que el precio de la cáscara de pistacho triturada es de 0,21 €/kg, con lo que el coste de alimentar estos equipos empleando este residuo es de 0,03 €/h·kW. A partir de un análisis comparativo con otros residuos de cultivos leñosos y pellets, se deduce que el coste es aproximadamente un tercio del asociado al uso de pellets (0,086 €/h·kW). Por tanto, la cáscara de pistacho, puede considerarse una alternativa válida para la alimentación de calderas policombustible.

9. BIBLIOGRAFÍA.

1. AGN. (2007, diciembre 10). ¿Para qué sirve la cáscara de castaña? *Diario de Pontevedra*.
2. Agrario, C., & Chaparrillo, E. (s/f). *LA RECOLECCIÓN Y EL PROCESADO DEL FRUTO EN EL PISTACHERO*. SAT PISTAMANCHA. Disponible en: <https://pistamancha.com/wp-content/uploads/Pistamancha-La-recoleccion-y-el-procesado-del-fruto-en-el-pistacho.pdf>
3. Arcos, G. (2021, diciembre 7). ¿Qué tipos de trituradoras industriales hay? Internaco División Medio Ambiente. Disponible en: <https://internacomedioambiente.es/noticias/que-tipos-de-trituradoras-industriales-hay/>
4. Arnabat, I. (2014, noviembre 13). *El hueso de aceituna como fuente de energía para suministro de calefacción y agua caliente sanitaria con calderas de biomasa*. Caloryfrio. Disponible en: <https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/biomasa/el-hueso-de-aceituna-como-fuente-de-energia-para-suministro-de-calefaccion-y-agua-caliente-sanitaria-con-calderas-de-biomasa.html>
5. Arnabat, I. (2020, diciembre 3). *Pellets como biocombustible ¿qué son y para qué se utilizan?* Caloryfrio. Disponible en: <https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/biomasa/biocombustibles-pellets.html>
6. Arnabat, I. (2022, junio 1). *Precios de la biomasa 2022 ▷ Hueso de aceituna y Astilla de madera*. Caloryfrio. Disponible en: <https://www.caloryfrio.com/noticias/informacion-mercado/precios-del-pellet-hueso-aceituna-astilla-de-madera-biocombustibles-solidos.html>
7. Arnabat, I. (2023a, abril 27). *Precio del pellet en España 2023 ▷ bajan los precios el primer trimestre*. Caloryfrio. Disponible en: <https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/biomasa/precios-especiales-en-sacos-de-pellets.html>
8. Arnabat, I. (2023b, abril 27). *Precio del pellet en España 2023 ▷ bajan los precios el primer trimestre*. Caloryfrio. Disponible en: <https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/biomasa/precios-especiales-en-sacos-de-pellets.html>
9. *Astilla de madera Estándar*. (s/f). Maderas García Varona. Disponible en: <https://www.garciavarona.com/producto/astilla-de-madera-estandar/>
10. Ballesteros, J. C. I., & Ordoñez, Y. J. R. (2017). *Biomasa para el aprovechamiento energético. Una revisión de la caracterización y los modelos por descomposición termoquímica*.
11. BOE. (2009, febrero 19). *Orden CIN/324/2009, de 9 de febrero, por la que se establecen los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Forestal*.
12. *Boiler systems*. (s/f). ERK Boiler Systems. Disponible en: <https://www.erk-systems.com/business-areas/boiler-systems/>

13. *Caldera de Microcogeneración*. (2013, abril 16). BaxiRoca. Disponible en: <https://caldera-condensacion.es/caldera-de-microcogeneracion/>
14. *Calderas de vapor, calderas de agua caliente*. (s/f). López Hermanos, S.A. <https://lopezhnos.es/>
15. *Calderas: Funcionamiento, Partes y Tipos*. (2020, marzo 12). Expertclima. Disponible en: https://expertclima.es/blog/69_calderas-funcionamiento-partes-tipos/
16. *Características y cuidados del almendro*. (2019, mayo 23). Viveros Barra. Disponible en: <https://viverosbarra.es/blog/arboles/caracteristicas-y-cuidados-del-almendro>
17. Carbonell, M. (2023, febrero 2). *Caldera de hueso de aceituna para la calefacción*. Hogarsense. Disponible en: <https://www.hogarsense.es/calefaccion/hueso-aceituna-combustible>
18. *Cáscara de Almendra*. (2016, febrero 19). Pellets del Sur. Disponible en: <https://pelletsdelsur.com/projects/cascara-de-almendra/>
19. *Cáscara De Almendra Como Excelente Biomasa*. (2015, noviembre 4). Calor Renove. Disponible en: <https://www.calorrenove.es/combustibles/cascara-de-almendra/>
20. *Cáscara triturada de almendra*. (s/f). COALCE, S.L. Disponible en: <https://coalce.com/producto/cascara-triturada-de-almendra-saco-de-20kg/>
21. *Castanea sativa*. (2015, octubre 7). Arbolapp; Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Disponible en: <https://www.arbolapp.es/especies/ficha/castanea-sativa/>
22. *Castaña, Castañas, Castaño, Castaños - Castanea sativa*. (s/f). Infojardin. Disponible en: <https://articulos.infojardin.com/Frutales/fichas/castanos-cultivo-castano.htm>
23. Ceballos, B. (2016, diciembre 4). Generar energía a partir de residuos del pistacho. *octubre/73*.
24. *Chaudière vapeur pour la combustion de grignons d'olives*. (s/f). Sugimat. Disponible en: <https://www.sugimat.com/fr/produits/chaudiere-vapeur-pour-la-combustion-de-grignons-dolives/>
25. Condemed, S. L. (2019, febrero 6). *Propiedades del pistacho*. El huerto urbano. Disponible en: <https://www.elhuertourbano.net/propiedades-del-pistacho/>
26. *¿Cuál es el precio del pistacho en lonja?* (2022, noviembre 17). AgroCLM. Disponible en: <https://www.agroclm.com/2022/11/17/cual-es-el-precio-del-pistacho-en-lonja/>
27. CYPE. (s/f). *Precio en España de m³ de Trituración de residuos vegetales*. CYPE Generador de Precios. Disponible en: https://www.generadordeprecios.info/obra_nueva/Gestion_de_residuos/GC_Tratamientos_previos_de_los_re/Trituracion_de_residuos/Trituracion_de_residuos_vegetales.html

28. De Andalucía, J. (s/f). *El olivo*. Disponible en: <https://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/18601059/helvia/aula/archivos/repositorio/250/313/html/Plan%201-6-09/Llano%20de%20la%20Perdiz/olivo.htm>
29. De Castilla y León, I. T. A. (s/f). *Partes del Fruto del Pistacho*. Disponible en: <https://www.pinterest.es/pin/738660776360350729/>
30. De Córdoba, P. (2021). *La exportación de pistachos españoles a Europa, el Lejano Oriente y El Magreb*. Universidad Pontifica de Comillas.
31. *El almendro, un árbol que anuncia la primavera*. (2021, febrero 1). Fundación Aquae. Disponible en: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/almendro/>
32. *¿En qué consiste la microgeneración?* (2018, julio 5). OCU. Disponible en: <https://www.ocu.org/vivienda-y-energia/energia-renovable/noticias/microgeneracion-domestica>
33. *Energylab, Centro Tecnológico de Eficiencia y Sostenibilidad Energética*. (2018, abril 18). Energylab. Disponible en: <https://energylab.es/proyectos-energylab-bioenergia/>
34. *Equipos de Microgeneración*. (s/f). Baxi. Disponible en: <https://www.baxi.es/productos/calderas-media-gran-potencia/microgeneracion>
35. Fernández, J. (Ed.). (2007). *Biomasa: Energías renovables para todos*. Haya Comunicación.
36. *Ficha técnica de la cáscara de frutos secos*. (2020, octubre). AgroBioHeat. Disponible en: https://agrobioheat.eu/wp-content/uploads/2020/10/AgroBioHeat_factsheet_nut_shells_es.pdf
37. Finlay, C. L. (1988). Industrialización de la Avellana. *El Campesino*, 50–56.
38. González, L. V. P., Gómez, S. P. M., & Abad, P. A. G. (2017). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(2), 141–150.
39. Guerra, A. (2020, septiembre 24). *Procesado de las aceitunas. Conoce el paso a paso*. Aceitunas Guerra. Disponible en: <https://www.aceitunasguerra.com/procesado-de-las-aceitunas/>
40. Hogarmania. (2016, noviembre 8). *Qué es el pellet y cuáles son las ventajas e inconvenientes de este combustible ecológico*. Hogarmania. Disponible en: <https://www.hogarmania.com/bricolaje/taller/materiales/pellets-ventajas-inconvenientes-este-combustible-34185.html>
41. *Hueso de aceituna*. (2019a, febrero 12). ExcelentesPrecios. Disponible en: <https://excelentesprecios.com/hueso-de-aceituna>
42. *Hueso de aceituna*. (2019b, febrero 12). ExcelentesPrecios. Disponible en: <https://excelentesprecios.com/hueso-de-aceituna>

43. *Hueso de aceituna en calderas de biomasa.* (2017, marzo 27). Hargassner. Disponible en: <https://www.hargassner.es/2017/03/27/hueso-de-aceituna-en-calderas-de-biomasa/>
44. *Huesos de aceituna para calderas de biomasa.* (2018, agosto 22). Trujal Hacienda Ortigosa. Disponible en: <http://www.haciendaortigosa.com/blog/huesos-de-aceituna-para-calderas-de-biomasa/>
45. Isaac. (2016, diciembre 14). *La cáscara de almendra vuelve a casa por navidad.* Forest Monitor en Español. Disponible en: <https://www.forest-monitor.com/es/la-cascara-almendra-vuelve-casa-navidad/>
46. Izquierdo, A. J. (1978). El Castaño, Árbol Frutal. *Hojas Divulgadoras del Ministerio de Agricultura*, 23-24/78.
47. Jardinatis. (2016, febrero 15). *Características y cultivo del almendro.* Hogarmania. Disponible en: <https://www.hogarmania.com/jardineria/fichas/arboles/caracteristicas-cultivo-almendro-31795.html>
48. José, V., Maximiliano, D., Nancy, Q., Miguel, U., & Marta, C. (2015). *Caracterización de cáscaras de pistacho y análisis de factibilidad de su valorización.*
49. López, J. F. C., Villaseñor, J. G., López, M. ^a. C., Elvira, A. M., López, D. P., & de Francisco, M. R. (2021). *El Cultivo del Pistacho.* Mundi-Prensa Libros.
50. Maderero, D. F. (2014, agosto 6). *Cómo se fabrican los pellets.* Forestal Maderero. Disponible en: <https://www.forestalmaderero.com/articulos/item/como-se-fabrican-los-pellets.html>
51. Ministerio de Agricultura, G. y. P. de A. (2016). *Protocolo de Calidad para Pistacho Seco.* Disponible en: https://alimentosargentinos.magyp.gob.ar/HomeAlimentos/Sello/sistema_protocolos/SAA032_Pistacho%20seco_v01.pdf
52. Ministerio de Agricultura, P. y. A. (s/f-a). *Aceituna.* Disponible en: https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/aceituna_tcm30-102885.pdf
53. Ministerio de Agricultura, P. y. A. (s/f-b). *Avellana.* Disponible en: https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/avellana_tcm30-102917.pdf
54. Ministerio de Agricultura, P. y. A. (2022a). Consumo Doméstico de Frutos Secos [Data set]. En *Informe del Consumo Alimentario en España 2021.* Disponible en: https://www.mapa.gob.es/es/alimentacion/temas/consumo-tendencias/informe-consumo-alimentario-2021-baja-res_tcm30-624017.pdf

55. Ministerio de Agricultura, P. y. A. (2022b). *Encuesta sobre Superficies y Rendimientos Cultivos (ESYRCE). Encuesta de Marco de Áreas de España*. ESYRCE. Disponible en: <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/esyrce/>
56. Ministerio de Agricultura, P. y. A. (2022c). *EXPORTACIÓN DE VEGETALES Y PRODUCTOS VEGETALES*. Comercio Exterior Vegetal. Disponible en: <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/comercio-exterior-vegetal/exportaciones.aspx>
57. Ministerio de Agricultura, P. y. A. (2022d). *Series de datos de consumo alimentario en hogares*. Panel de Consumo Alimentario. Disponible en: <https://www.mapa.gob.es/es/alimentacion/temas/consumo-tendencias/panel-de-consumo-alimentario/series-anuales/default.aspx>
58. Naturbero. (2016, noviembre 18). *Usos del pellet que no conocías*. Naturbero. Disponible en: <https://www.naturbero.com/usos-del-pellet-que-no-conocias>
59. ¿Para qué sirven las cáscaras del pistacho? (2022, abril 26). *Pistamed*. Disponible en: <https://pistamed.com/para-que-sirven-las-cascaras-del-pistacho/>
60. ¿Pellets o huesos de aceituna? (2015, diciembre 31). Baena Solar. Disponible en: <https://www.baenasolar.es/pellets-o-huesos-de-aceituna/>
61. Pelletsolucion. (2016, enero). *Guía Técnica Para La Elaboración de Pellet de Biomasa*. Disponible en: https://www.pelletsolucion.com/wp-content/uploads/2016/01/GUIA_T%C3%89CNICA_PARA_LA_ELABORACI%C3%93N_DE_PELLET_DE_BIOMASA.pdf
62. Proinco. (2016, septiembre 9). Qué es el pellet: definición y ventajas. *Comunidad PROINCO*. Disponible en: <https://blog.proinco.es/el-pellet-definicion-ventajas/>
63. Puigdollers, C. B., Valls, N. B., Gómez, M. C., & Esteve, É. P. (2018). *Aspectos básicos relacionados con el funcionamiento de una caldera*. Universitat Politècnica de Valencia.
64. ¿Qué es la cogeneración y cómo funciona? (2019, septiembre 30). Energía viva nabalia. Disponible en: <https://nabaliaenergia.com/blog/que-es-la-cogeneracion-y-como-funciona/>
65. ¿Qué es una caldera y sus tipos? (s/f). HidaGas. Disponible en: <https://www.hidalgas.es/que-es-una-caldera-y-sus-tipos/>
66. *Qué son los pellets*. (s/f). Tiendabiomasa. Disponible en: <https://tiendabiomasa.com/pellet>
67. ¿Qué son los pellets? (2019, octubre 9). *Dankesol*. Disponible en: <https://dankesol.com/que-son-pellets/>

68. *¿Qué tipos de calderas existen?* (2023, febrero 2). Hogarsense. Disponible en: <https://www.hogarsense.es/calefaccion/tipos-calderas>
69. Ramirez, N. (s/f). TRITURACIÓN. *ProIndustriales*. Disponible en: <http://proindustriales.blogspot.com/2013/05/trituracion.html>
70. Ramos, P. M., & Gil, J. M. (2017). *Biorrefinerías basadas en explotaciones agropecuarias y forestales*. Universidad de Zaragoza.
71. Rodríguez, J. (2019). *Biomasa forestal - Producción de pellets*. Disponible en: https://eforown.ctfc.cat/pdf/44b_3_Biomasa%20forestal%20-%20Produccion%20de%20%20Pelets.pdf
72. Rosendahl, L. (2013). *Biomass combustion science, technology and engineering*. Woodhead Publishing.
73. Sánchez-Gil, D. G.-M. (2021, abril 2). *Partes del fruto de pistacho y consumo*. Grupo IberoPistacho. Disponible en: <https://iberopistacho.com/partes-del-fruto-de-pistacho-y-consumo/>
74. *Sincal TH - Calderas de fluido térmico sin serpentín*. (s/f). Sincal. Disponible en: <https://sincal.es/calderas-th/>
75. *Sistemas de trituración de biomasa sólida*. (s/f). GEMCO ENERGY. Disponible en: <http://www.peletizadoras.com/FAQ/trituracion-biomasa-solida.html>
76. TCPEL. (2022, septiembre 13). *¿Cuánto aserrín hace una t de pellets?* TAICHANG. Disponible en: <https://www.tcpel.com/es/how-much-sawdust-makes-a-ton-of-pellets/>
77. *Thermal Oil Boiler*. (2018). KohlBach. Disponible en: <http://www.kohlbach.at/en/cetest-firstpage0/produkte/#en/cetest-firstpage0/produkte/kesselsysteme/thermoelkessel/?print=434>
78. *Tipos de calderas y sus características*. (2019, octubre 16). Linacal. Disponible en: <https://linacal.com/tipos-de-calderas-y-sus-caracteristicas/>
79. *Trituradoras de Impactos*. (2018, julio 19). Sotecma. Disponible en: <https://www.sotecma.es/equipos-trituracion-molienda/trituradora-impactos/>
80. Twenergy. (2019, marzo 13). *Estufas de cáscara de almendra*. Twenergy. Disponible en: <https://twenergy.com/energia/biomasa/estufas-de-cascara-de-almendra-1625/>
81. Ubeda, M. (2015). *Cáscaras de avellana, futuro biocombustible para Chile*. El Ciudadano. Disponible en: <https://www.elciudadano.com/medio-ambiente/cascaras-de-avellana-futuro-biocomubsible-para-chile/01/12/>
82. Universidad de Vigo. (2016, octubre 18). *La cáscara de castaña, eficaz en la eliminación de metales pesados y pesticidas en el agua*. iAqua. Disponible en:

<https://www.iagua.es/noticias/espana/universidad-vigo/16/10/18/cascara-castana-eficaz-eliminacion-metales-pesados-y>

83. Van Loo & Jaap Koppejan, S. (2008). *The Handbook of Biomass Combustion & Co-firing*. Earthscan.
84. *Venta de hueso de aceituna para estufas*. (s/f). Aceites Alarcón. Disponible en: <https://www.aceitesalarcon.es/tienda-hueso-de-aceituna/saco-15kg-25-unidades>
85. *Ventajas de la cáscara de almendra como combustible*. (2020, septiembre 13). Biomasa Market. Disponible en: <https://www.biomasamarket.es/ventajas-cascara-almendra-combustible/>
86. *Vivero Pistacho KERMAN*. (2020, agosto 20). Vivero Vettonia. Disponible en: <https://www.viverovettonia.com/vivero-pistacho-kerman/>

10.ANEXOS.

A. I. Residuos de otros cultivos leñosos y otros residuos

A.I.I. Cáscara de avellana

La avellana es un fruto seco procedente del árbol “*Corylus avellana*” de corteza marrón, pálida o gris y profundamente estriada, con hojas caducas redondeadas y pubescentes y con bordes doblemente aserrados.

Es un árbol monoico y el fruto se encuentra protegido en un pequeño y hojoso involucre. La maduración tiene una duración de entre 7 y 8 meses y una vez alcanzada, tiene lugar la apertura de dicho involucre liberándose así el fruto.

Además, se trata de un árbol de climas templados que requiere de un terreno profundo, blando y con un pH ácido.

La recolección del fruto tiene lugar entre los meses de septiembre y octubre y se suele llevar a cabo de forma manual en los primeros años o en huertos pequeños y de forma mecanizada en el resto de situaciones. En este último caso, es necesaria una preparación previa del terreno eliminando las malezas y llevando a cabo un nivelado y ordenando las avellanas en hileras mediante el uso de sopladores para que las cosechadoras autopropulsadas puedan recoger fácilmente la cosecha.

Una vez llevada a cabo la recolección, el fruto obtenido es trasladado a la procesadora donde se lleva a cabo una separación dependiendo de su calibre dado que este fruto seco presenta importantes variaciones en cuanto al tamaño.

Los distintos tamaños que se pueden encontrar en el caso de la avellana son:

- Tamaño grande = 16 mm, suponen un 55% de la producción total.
- Tamaño mediano = 12 mm, suponen un 43% de la producción total.
- Tamaño pequeño = < 12 mm, se descartan y suponen un 2% de la producción total.

Tras la clasificación por tamaños, el fruto es secado para reducir su humedad y partido por presión separando posteriormente el grano aprovechable de la cáscara mediante flotación.

Finalmente, es necesario eliminar la cascarilla o cutícula protectora de la semilla bien mediante un pelado químico o mecánico obteniendo el fruto listo para consumir.

Por tanto, el residuo obtenido de este proceso y susceptible a ser aprovechado como combustible calorífico es la cáscara de avellana que se trata de una capa fibrosa externa de carácter leñoso que rodea una cubierta lisa en la que se encuentra la semilla.

Los rendimientos obtenidos tras el tratamiento de 1.000 kg iniciales de avellana se representan en la Tabla A.I. I.

Tabla A.I. I. Rendimientos del procesado de la avellana y separación del fruto y la cáscara. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos de Finlay, 1988.

	PÉRDIDAS	CÁSCARA	CASCARILLA	AVELLANA LIMPIA
PORCENTAJE	2%	65%	6%	27%
KG	20	650	60	270

Para conocer el poder calorífico y cómo se comporta la cáscara de avellana frente a la combustión es importante conocer los componentes que la conforman representados en la Tabla A.I.II.

Tabla A.I.II. Componentes que constituyen la cáscara de avellana. Fuente: Ballesteros et al, 2017.

CÁSCARA DE AVELLANA			
Componentes	Hemicelulosa	Celulosa	Lignina
Proporción	29,90%	25,90%	42,50%

Como se puede observar en la tabla anterior, la cáscara de avellana está principalmente formada por celulosa y lignina lo que se traduce en que requiere de unas mayores temperaturas para entrar en combustión que en el caso del pistacho.

Además, es importante conocer el porcentaje de carbono fijo, de materia volátil y de cenizas contenidas en la cáscara de pistacho debido a su influencia en la combustión. Para entenderlo, es importante conocer qué significa cada factor:

- La materia volátil hace referencia al conjunto de componentes del carbón, exceptuando al agua, que son liberados a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. Resulta de gran importancia debido a que se trata de la fracción más representativa del contenido de la biomasa que ronda entre un 75% y un 90%, lo que provoca que los biocombustibles sean fáciles de encender a temperaturas cercanas a los 350 °C.
- El carbono fijo hace referencia a la parte no volátil del carbón, es decir, a la parte que no se evapora al experimentar la aplicación de calor, permaneciendo en forma sólida y quemándose posteriormente una vez que la parte volátil haya sido liberada.
- Las cenizas son el producto que se obtiene de la combustión de algún material, en este caso de la cáscara de avellana, formado por sustancias inorgánicas no combustibles como puede ser el caso de las sales minerales. Es importante conocer el porcentaje de cenizas generados porque son la muestra de los residuos que se obtienen.

Los porcentajes de estos factores se muestran en la Tabla A.I. III.

Tabla A.I. III. Análisis de la cáscara de avellana. Fuente: Ballesteros et al, 2017.

CÁSCARA DE AVELLANA		
Carbono Fijo (FC)	Materia Volátil (VM)	Cenizas
28,30%	69,30%	1,40%

A.I.II. Cáscara de castaña

El castaño es un árbol de la especie "*Castanea sativa*" perteneciente a la familia *Fagaceae* que produce un fruto denominado castaña.

Es un árbol longevo, de fuste recto con copa amplia y frondosa. Su corteza es de color pardo rojiza y lisa en los individuos jóvenes y se transforma al color pardo-grisácea y profundamente asurcada a medida que envejecen.

El sistema radicular es bastante profundo pero extendido y robusto. Posee hojas alternas y caducas de forma elíptico-lanceolada y aserradas de forma regular en los bordes.

La floración tiene lugar en verano de tal manera que las flores masculinas conforman una agrupación denominada amento de largos y estrechos filamentos de color amarillo y las femeninas se disponen en la base de éstos. Una vez que tenga lugar la fecundación, en el interior de las flores femeninas se encuentran las semillas o castañas que se encuentran protegidas por una cubierta espinosa denominada erizo.

Se trata de una especie que prefiere lugares frescos de suelos profundos en zonas montañosas. Además, necesita de climas templados, es decir, es poco resistente tanto a las heladas intensas del invierno como a las profundas sequías del verano.

La recolección de la castaña tiene lugar cuando el erizo llega a la madurez desprendiéndose de la castaña a principios de octubre, es decir, al inicio del otoño. La recogida se puede realizar a mano empleando cestas de mimbre para que el fruto respire y no se pudra o con la ayuda de un aspirador.

Una vez llevada a cabo la recolección, es importante comprobar la calidad y estado del fruto puesto que pueden existir castañas paletas, es decir, que no están llenas o castañas blancas, que no han llegado al estado de maduración correcto.

Posteriormente, son llevadas a fábrica donde primero experimentan un proceso de selección separando por tamaños y una limpieza de los restos de tierra, hojas o piedras entre otros. El siguiente paso es clasificar los frutos según el calibre que posean y de la variedad que sean. Los distintos calibres que pueden presentar las castañas son:

- Calibre <40 = >25 gramos
- Calibre 40 – 50 = 20 – 25 gramos
- Calibre 50 – 60 = 16,5 – 20 gramos
- Calibre 60 – 70 = 14 – 16,5 gramos
- Calibre 70 – 80 = 12,5 – 14 gramos
- Calibre 80 – 90 = 11 – 12,5 gramos
- Calibre 90 – 100 = 10 – 11 gramos
- Calibre 100 – 130 = 7,5 – 10 gramos
- Calibre >130 = <7,5 gramos

Finalmente, estos frutos estarán listos para su consumo directo o para su procesado y envasado.

Es importante destacar que, dada la dificultad del cultivo de esta especie por sus exigencias de altitud y por su recolección, existen varias Denominaciones de Origen dependiendo las variedades.

Según la tesis doctoral de Marta Cobas realizada en el Grupo de Bioingeniería y Procesos Sostenibles de la Universidad de Vigo, la cáscara de castaña es un material muy eficiente en la eliminación de compuestos contaminantes, metales pesados y pesticidas presentes en el agua.

Según los datos aportados por la investigadora de la tesis doctoral mencionada anteriormente, la cáscara de castaña supone un 10% del total de la recolección. Por tanto, si se recogen 1.000 kg de castañas, 100 kg se corresponden con la cáscara. El porcentaje correspondiente a la cáscara es mucho menor que en el caso del pistacho o de la avellana.

A.I.III. Cáscara de almendra

El almendro es un árbol de la especie "*Prunus dulcis*" perteneciente a la familia *Rosaceae*. Posee una altura entre los 3 y 5 metros de altura con un tronco de corteza marrón y agrietada. Sus hojas son lanceoladas, estrechas, largas y puntiagudas de color verde.

Este árbol es propio de un clima seco y cálido, incapaz de tolerar las heladas y que necesita luminosidad. Además, prefiere suelos ligeramente arenosos.

La floración tiene lugar a finales de invierno entre finales de enero y febrero mediante la aparición de flores con cinco pétalos de tonos blanquecinos y rosados.

La recolección tiene lugar nueve meses después de la floración, es decir, entre los meses de agosto y septiembre. La recolección de la almendra se puede llevar a cabo de forma tradicional empleando los “varados” que consisten en golpear al árbol con una vara para que los frutos caigan o también se suelen emplear los paraguas vibradores como en el caso del pistacho mecanizando y aumentando la eficiencia del proceso.

Tras la recogida, la almendra es transportada a la planta productora y debe experimentar el descascarado que consiste en la separación entre la semilla y la cáscara exterior que la protege. Para que ello tenga lugar, se desarrollan los siguientes procesos:

- Recepción, pesado, clasificación y muestreo = se identifica el origen del fruto que es pesado y clasificado atendiendo a su tamaño y a su variedad y finalmente, se evalúa su calidad mediante un muestreo que se centra en la humedad y el rendimiento del lote.
- Limpieza = los frutos atraviesan la máquina despalladora encargada de eliminar impurezas y restos de ramas, tallos u hojas.
- Almacenamiento y mojado = el fruto limpio se almacena en silos secos y es trasladado donde se remoja durante un período de entre 24 y 48 horas consiguiendo ablandar la cáscara para que pueda eliminarse la cáscara sin dañar la semilla.
- Introducción a la máquina calibradora y rompedora = el fruto es separado por calibres y la cáscara es partida.
- Separación = se separan los elementos sin cáscara con lo que aún no están completamente descascarados para que se dirijan de nuevo a la máquina rompedora.
- Máquina electrónica = se lleva a cabo un primer y un segundo cribado a través de máquinas electrónicas filtrando la almendra con el objetivo de recuperar los granos y trozos descartados. Finalmente, se realiza una clasificación de las semillas atendiendo al tipo de partidor empleado que puede ser por pinchos, electrónico o por gravedad.
- Secado = el producto es dirigido a tanques de secado donde recibe aire caliente manteniendo la temperatura controlada durante unas 6 horas como poco.
- Calibrado por selección electrónica y detección de metales = se realiza una separación del producto de acuerdo a su calidad para clasificarlo según la demanda además de eliminarse los metales mediante un detector.
- Selección manual = inspección visual humana para descartar aquel producto que no cumpla con las exigencias de los clientes o de la industria.

La cáscara de almendra tiene diversas utilidades entre las que se encuentran la producción de leche de almendra, la industria cosmética y actualmente, está siendo un producto bastante empleado para la combustión debido a su alto poder calorífico además de ser renovable y muy económico.

El peso medio de cada pepita de almendra ronda los 1,2 gramos. Teniendo en cuenta que, por cada kilo de almendras, existen aproximadamente unas 190 piezas, en 1.000 gramos de producción almendra, existirán 228 gramos de pepita. Esto equivale a unos rendimientos del 25%, es decir, del total de la almendra producida, se obtiene aproximadamente un 75% de cáscara. Por tanto, de 1.000 kg de almendra recolectada, 750 kg se corresponden con la cáscara.

Para su combustión en biomasa, podemos encontrar la cáscara de almendra en tres estados distintos: en polvo, triturada o entera. Se utiliza un tipo u otro dependiendo de la estufa que se quiera alimentar.

La composición de la cáscara de almendra depende de su grado de trituración, si se encuentra triturada de 2 a 6 milímetros o si se encuentra triturada de 6 a 12 milímetros.

En la Tabla A.I. IV y Tabla A.I.V se recogen las composiciones de humedad, cenizas y elementos químicos principales de la cáscara de almendra triturada de 2 a 6 milímetros que resultan ser idénticas a las de la cáscara de almendra triturada de 6 a 12 milímetros.

Tabla A.I. IV. Análisis inmediato de la cáscara de almendra triturada. Fuente: Ballesteros et al, 2017.

CÁSCARA DE ALMENDRA TRITURADA			
Humedad Total (%)		Cenizas (%)	
Seca	Húmeda	Seca	Húmeda
<12,5	<15,02	<1,3	<1,15

Tabla A.I.V. Análisis elemental de la cáscara de almendra triturada. Fuente: Ballesteros et al, 2017.

CÁSCARA DE ALMENDRA TRITURADA		
Elemento Químico	Seca	Húmeda
Carbono (%)	50,51	42,92
Hidrógeno (%)	5,81	6,61
Nitrógeno (%)	0,21	0,18
Azufre (%)	0,02	0,02
Cloro (%)	0,02	0,02
Oxígeno (%)	42,21	49,21

A.I.IV. Hueso de aceituna

La aceituna es el fruto del olivo perteneciente a la especie *Olea europaea* de la familia *Oleaceae*. El olivo es un árbol de hoja perenne con haz verde oscuro y envés blanquecino con una altura entre cuatro y doce metros y con un sistema radicular poco desarrollado.

El olivo es un árbol de climas secos y cálidos, típico de la región mediterránea. Es propio de suelos arcillo-arenosos y de poca humedad.

La floración ocurre a finales de primavera con la aparición de flores de tonalidad blanco-verdosa de un solo pétalo y tamaño pequeño.

Una vez formados los frutos que son de tipo drupa tendrá lugar la recolección a finales de septiembre. La recogida se puede llevar a cabo de forma manual mediante un proceso denominado “ordeño” o de manera mecanizada empleando paraguas vibradores como en el caso del pistacho y de la almendra, pero siempre depositando la cosecha en recipientes abiertos para que los frutos se encuentren aireados.

Dependiendo del momento de recolección, las aceitunas tendrán un color u otro.

Posteriormente, la cosecha es dirigida a las fábricas para que tenga lugar el siguiente procesado dado que de forma natural son productos amargos.

- Clasificación = las aceitunas son clasificadas por variedades y tamaños para experimentar un proceso de limpieza eliminando los restos de ramas y tierra.
- Cocido = la cosecha limpia es cocida durante 6 horas en el caso de variedades pequeñas y 10 horas en las de tipo gordal en una disolución de hidróxido de sodio o sosa cáustica en agua a temperatura ambiente.
- Lavado = una vez cocidas las aceitunas, son lavadas durante varias horas con el objetivo de eliminar los restos que puedan poseer.
- Curado = ya lavadas se sitúan en unos bidones con agua y sal (salmuera) y con otras especias y aditivos para que poco a poco experimenten el proceso del curado aportándolas sabor y sirviendo de conservante.
- Envasado = tras un mínimo de 30 días en la fase del curado, se realiza una última clasificación por categorías y tamaños y las aceitunas son envasadas en latas o tarros

de cristal prestando especial atención a que la salmuera las cubra bien para que se conserven de forma adecuada.

Las aceitunas se emplean o bien como frutos carnosos comestibles o bien para la fabricación de aceite. En el caso de las aceitunas de mesa, existen diferentes tipos bien atendiendo a sus variedades o a su color.

Atendiendo a sus variedades:

- Gordal = mayor tamaño y sabor más fuerte.
- Manzanilla = menor tamaño, carnosas, de consistencia blanda y de hueso pequeño.
- Hojiblanca = similares a la anterior, pero de carne algo más dura y de color entre verdoso y negro.

Atendiendo a su color, las aceitunas de mesa se clasifican en:

- Verdes = recolectadas antes del inicio de la maduración.
- De color cambiante = obtenidas de frutos con color rosa vino, rosado o castaño.
- Negras naturales = recogidas en plena madurez.
- Negras oscurecidas por oxidación.

Dado que las aceitunas son un fruto de tipo drupa, su consumo genera un residuo, el hueso de aceituna. El hueso de aceituna se ha empleado para descontaminar aguas residuales, para luchar contra las plagas e incluso para organizar concursos populares de lanzamiento de hueso. Sin embargo, la utilidad más rentable actualmente es su empleo como combustible.

El hueso de aceituna posee unas características adecuadas para su aprovechamiento como biomasa debido a su baja humedad, elevada densidad y a su alto poder calorífico. Este residuo debe ser procesado y seleccionado para que esté listo para ser aprovechado como biomasa. Es muy importante que se encuentre seco y libre de impurezas para entrar en combustión.

En cuanto a la composición de los biocombustibles, poseen un alto contenido en oxígeno y compuestos volátiles y un bajo contenido en carbón y en azufre.

Los rendimientos obtenidos del hueso de aceituna son de un 15%, ya que se estima que por cada kilo de aceitunas se obtienen 150 gramos de hueso. Si lo extrapolamos a 1.000 kg de producción de aceituna, se obtendrán 150 kg de hueso de aceituna.

A.I.V. Pellets

Los pellets son residuos obtenidos de limpiezas forestales formados por serrín natural seco y la lignina del propio serrín que se utiliza como aglomerante. Para su formación, el serrín es comprimido a altas presiones reduciendo así su humedad, haciendo que tengan una composición densa y dura y, aportándoles la forma de cilindros muy pequeños de un diámetro de aproximadamente de 1 a 3 cm.

El principal uso de los pellets es como biomasa natural para la calefacción y el agua caliente de cualquier edificio dado que son de fácil manejo y ocupan poco espacio. Además, los pellets están catalogados como un combustible de CO₂ neutro, es decir, el valor de CO₂ absorbido durante el crecimiento de las plantas de las que se va a obtener el serrín para la fabricación de este tipo de biomasa es igual al valor de emisiones de CO₂ emitidas durante su combustión.

Sin embargo, aunque no es lo más común, los pellets presentan otro tipo de usos como:

- Camas para caballos = los pellets son un producto natural que no presenta ningún componente químico lo que les hace ser aptos para el lugar de descanso de los animales.

- Abono de jardín = las cenizas obtenidas de la combustión de este tipo de biomasa son ideales para aportar al suelo nutrientes naturales y reducir su pH.
- Arena para gatos = la característica de absorber la humedad que poseen los pellets los hace ideales para emplearlos como sustituto de la arena para gatos.

El serrín que conforma los pellets puede proceder de cualquier especie de madera o de la paja de cereales, e incluso de la combinación entre cualquier especie de madera y el carbón. Sin embargo, los materiales más comunes que pueden conformar los pellets proceden de madera de pino, de resina o de la paja de cereales siendo la madera de pino la más recomendable por excelencia. Para la fabricación de los pellets, es necesario que la materia prima presente unos determinados valores de humedad para su posterior peletizado tal y como se muestra a continuación:

- El serrín de madera de encina deberá poseer entre un 11 y 12% de humedad.
- El serrín de madera de pino rondará un 14% de humedad.
- El serrín de paja de cereales presentará un 18% de humedad.

Dado que los pellets proceden del serrín de la madera es importante conocer sus características físico-químicas. A pesar de que la composición química de la madera depende de la especie de la que proceda, generalmente es la que se muestra en la Tabla A.I. VI expresada en porcentaje respecto del peso.

Tabla A.I. VI.. Composición química de la madera. Fuente: Ballesteros et al, 2017.

COMPONENTES QUÍMICOS DE LA MADERA			
Celulosa	Lignina	Hemicelulosa	Extractos
50%	23 – 33%	15 – 30%	5 – 30%

Los extractos que conforman la madera pueden ser colorantes, aceites esenciales, ceras, gomas, resinas o tanino.

A. II. Análisis de Laboratorio

		
* 230546 *		
INFORME DE RESULTADOS		
Ciudad: Mª Emilia Rita Delgado Merino NIF: 12723383 J Domicilio: C/ La iglesia, 27 Población: 34113 Villambroz (PALENCIA)	Núm.Boletín: 27535 Reg. Salida: 10993	Nº Muestra: 230546 Registro muestra: 29/03/2023 Inicio análisis: 10/04/2023 Finalización análisis: 13/04/2023
Muestra de: Residuo Referencia: Cáscara pistacho		
Nombre Determinación	Resultado	Método
Humedad	7.62 g/100g	Estufa 105 °C
Cenizas	1.61 % s.m.s.	Calcinación 550 °C
Materia Orgánica	98.39 % s.m.s.	Calcinación
Carbono total	57.20 % s.m.s.	Calcinación 550 °C
La muestra fue facilitada por el propio cliente. El análisis sólo da fe de la muestra recibida. Este boletín no se puede reproducir parcialmente sin la aprobación por escrito de la entidad emisora.		
Emitido por:	Laboratorio	
	PALENCIA, 20 de Abril de 2023	
		Director técnico del laboratorio
		MARTA SÁNCHEZ MARTÍN
Pág. 1 / 1		
ITAGRA.CT- Av/ de Madrid, 44 (La Yutera) 34004 Palencia Fax 979 165 970-Tfno.979 108 446 - E-mail: laboratorios@itagra.com - www.itagra.com		