



**universidad
de león**

TESIS DOCTORAL

**INFLUENCIA DEL TIPO DE ABONADO EN LA
CAPACIDAD TÉRMICA DE BIOMASAS DE
CULTIVOS TRADICIONALES (CHOPO Y
CHIRIMOYA) Y DE NUEVA IMPLANTACIÓN
(QUINOA). DIFERENCIAS
TERMOGRAVIMÉTRICAS EN SU
COMPORTAMIENTO TÉRMICO BAJO DIFERENTES
ATMÓSFERAS DE CALENTAMIENTO**

Alba de Prado Guerra

Programa de doctorado: Ingeniería de Biosistemas.

Tutor: Dr. Luis Fernando Calvo Prieto

Dirigida por: Dr. Luis Fernando Calvo Prieto y Dr. Sergio Paniagua Bermejo

León, 2023

- Tesis Doctoral Por Compendio De Publicaciones -

Paniagua, S., **Prado-Guerra, A.**, García, A. I. y Calvo, L. F. (2019). Bioenergy derived from an organically fertilized poplar plot: overall TGA and index estimation study for combustion, gasification and pyrolysis processes. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 9, 749-760. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00392-7>

Paniagua S., **Prado-Guerra, A.**, García, A. I. y Calvo, L.F. (2020). Study of quinoa plant residues as a way to produce energy through thermogravimetric analysis and indexes estimation. *Renewable energy*, 146, 2224-2233. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.056>

Prado-Guerra, A., Calvo, L. F., Reyes, S., Lima, F. y Paniagua, S. (2022). Custard apple crop residues combustion: an overall study of their energy behaviour under different fertilisation conditions. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03046-3>

**«Me enervan los que no tienen dudas,
y aquellos que se aferran
a sus ideales sobre los de cualquiera»**

- Francisco M. Ortega Palomares & Extremoduro – StandBy -

- Agradecimientos -

Sin lugar a duda, y sin demorarlo más, mi más sincero agradecimiento a los directores de esta tesis, el Dr. Luis Fernando Calvo y el Dr. Sergio Paniagua. Gracias por cuadrar vuestros multiversos, encontraros en el camino y trabajar juntos del modo en el que lo hacéis ya que si una cosa está clara es que sin vosotros esta tesis nunca hubiera existido.

Del mismo modo, gracias a mi familia y principalmente a mis padres, por darme siempre la libertad de ser y hacer, aun sabiendo que luego acabaríamos en la cocina con el bote de mercurio. Creo que no hay regalo más bonito y valioso. Carla, Adrián, Rocío, gracias por ser partícipes del humor absurdo que nos caracteriza, por ser respeto y apoyo incondicional. Francisco, gracias por tu paciencia infinita desde tiempos inmemorables. A Ellos, mis eternos, los que hoy me faltan pero sé que saldrían orgullosos a las solanas, y especialmente él, siempre apareciendo en mis trabajos, exámenes o deberes y la tesis no iba a ser menos. Andrea, Sara, Elena, claramente os incluyo en este apartado. Adoro las coincidencias y vosotras habéis sido mi casualidad favorita. Gracias por tirar de mí cuando las fuerzas flaquean.

Si algo bonito me llevo de la ULE es a ellas, las Alubias. (♪♪)...Mis compañeras, las que me llenan y entregan su amistad, mis compañeras, las que me dan seguridad para salvar los malos tragos, para no abandonar el barco...(♪♪) Representáis la amistad más pura, más desinteresada y más bonita. Habéis aguantado berrinches y quejas y habéis evitado que tire la toalla en infinidad de ocasiones. Virgu, ánimo bella, último empujón, si lo necesitas nos damos unas vueltas en el 4. Orgullosa de vosotras.

Mi familia palentina, de Palencia con "P". Qué suerte formar parte de ese equipo que absorbe, que acoge y representa en todos los aspectos la familia más variopinta pero genial que puede existir. Convento de Mave, Cildá, los que estuvieron, los que están y los que estarán, un pedacito de todo esto es vuestro. Gracias por ser hogar.

Y como no, la costa leonesa más paradisiaca, con sus olas de espigas mecidas por el viento y los atardeceres más bonitos. Sus calles, sus gentes, su particular aroma y el maravilloso modo de vida que allí se adquiere. La paz, la calma y la desconexión en su máxima expresión. Chiguitas, chiguitos, solo nosotros sabemos la suerte que tenemos y lo afortunados que somos de poder disfrutarlo. Sois amistad, familia. Calzadilla, que bonita eres. Cazorra y Atravesada.

El último, pero uno de los más importantes. Gracias a Él. Llegaste poco después del inicio de esta andadura pero lo cierto es que ya llevamos cientos de kilómetros recorridos juntos. Siempre elegiste quedarte y cada hora invertida en esto es tanto mía como tuya. Eres magia. Amor sin adornos. Ojalá tenerte siempre.

Del mismo modo, gracias a cada lector que invierta su tiempo en estas páginas.

- Índice General De Contenidos -

Resumen	XVII
Abstract	XIX
Listado De Abreviaturas	XXIII
Capítulo 1. Presentación	1
Justificación De Las Unidades Temáticas	3
Referencias Bibliográficas	5
Resumen De Las Publicaciones	9
Capítulo 2. Introducción	13
Necesidad En La Búsqueda De Nuevos Combustibles En Detrimento De Los Combustibles Fósiles	15
La Biomasa Como Combustible	18
Composición De La Biomasa	21
Procedencia De La Biomasa	24
Biomasa Agrícola	25
Biomasa Forestal	26
Biomasa Industrial	27
Procesos De Conversión Energética De La Biomasa	27
Formas De Aprovechamiento: Procesos Termoquímicos	31
<i>Combustión</i>	32
<i>Pirólisis</i>	37
<i>Gasificación</i>	40
Beneficios y Limitaciones Del Uso de Biomasa Como Fuente de Energía	45
Marco Legal De Las Energías Renovables	48
Cultivos Energéticos Tradicionales	49
Cultivo Energético Forestal De Chopo (<i>Populus</i> sp.)	53
Distribución Geográfica	53
Condiciones De Cultivo	54
Botánica	54

El Chopo Como Combustible	55
Aprovechamiento Energético De Nuevas Fuentes Biomásicas	57
Quinoa (<i>Chenopodium quinoa</i> Willd.)	57
<i>Distribución geográfica</i>	57
<i>Condiciones de cultivo</i>	58
<i>Botánica</i>	58
<i>Metabolitos clave</i>	59
<i>Propiedades médicas</i>	61
<i>Quinoa como combustible</i>	61
Chirimoya (<i>Annona cherimola</i> Mill.)	62
<i>Distribución geográfica</i>	62
<i>Condiciones de cultivo</i>	63
<i>Botánica</i>	63
<i>Metabolitos clave</i>	66
<i>Propiedades médicas</i>	66
<i>Chirimoya como combustible</i>	67
Referencias Bibliográficas	68
Capítulo 3. Objetivos	81
Capítulo 4. Materiales y Metodología	85
Cultivo Energético de <i>Populus</i> sp.	87
Materiales	87
Metodologías	87
Residuos Agrícolas de Quinoa	88
Materiales	88
Metodologías	88
Residuos Agrícolas de Chirimoya	88
Materiales	88
Metodologías	89
Capítulo 5. Primera Publicación	91

“Bioenergy derived from an organically fertilized poplar plot: overall TGA and index estimation study for combustion, gasification and pyrolysis processes”

Capítulo 6. Segunda Publicación 95

“Study of quinoa plant residues as a way to produce energy through thermogravimetric analysis and indexes estimation”

Capítulo 7. Tercera Publicación 99

“Custard apple crop residues combustion: an overall study of their energy behaviour under different fertilisation conditions”

Capítulo 8. Resultados Y Discusión 103

Cultivo Energético de *Populus* sp. 105

Propiedades Edáficas Y Datos Lignocelulósicos 105

Propiedades Del Combustible 106

Resultados Termogravimétricos 106

Parámetros Cinéticos 107

Índices Térmicos 107

Residuos Agrícolas De Quinoa 108

Propiedades Del Combustible 108

Resultados Termogravimétricos 108

Índices Térmicos 110

Residuos Agrícolas De Chirimoya 110

Propiedades Del Combustible 110

Resultados Termogravimétricos 111

Parámetros Cinéticos 111

Referencias Bibliográficas 113

Capítulo 9. Conclusiones 117

Relativas al Cultivo Energético De *Populus* sp. 119

Relativas a Los Residuos Agrícolas De Quinoa 120

Relativas a Los Residuos Agrícolas De Chirimoya 121

Capítulo 10. Conclusions	123
Related to <i>Populus</i> sp. Energy Crops	125
Related to Quinoa Farming Residues	126
Related to Chirimoya Farming Residues	127

- Índice General De Tablas -

Tabla 1. Evolución de la cantidad de calor producido (TJ) a partir de biomasa a nivel mundial entre los años 2000 y 2020 (World Biomass Association, WBA, 2022)	21
Tabla 2. Principales diferencias entre los procesos termoquímicos estudiados: combustión, pirólisis y gasificación	31
Tabla 3. Tipos de pirólisis: características y diferencias entre ellos	39

- Índice General De Figuras -

Figura 1. Consumo mundial total de energía en 2017 (Agencia Internacional de la Energía, IEA, 2019)	17
Figura 2. Hoja de ruta para la energía renovable (REmap) 2050. Desglose del uso de energías renovables en términos de consumo total de energía a nivel mundial (Agencia Internacional de las Energías, IRENA, 2019)	18
Figura 3. Estadísticas mundiales sobre energías renovables y especialmente biomasa en el año 2020 (WBA, 2022)	20
Figura 4. Componentes y estructura 3D simplificada de las paredes celulares vegetales lignocelulósicas (Brethauer et al., 2020)	23
Figura 5. Tipos de biomasa en base a diferentes criterios	25
Figura 6. Procesos de transformación energética de la biomasa relacionados con sus productos finales	28
Figura 7. Perfil termogravimétrico obtenido a partir de las muestras analizadas de semillas de chirimoya bajo fertilización mineral (Capítulo 7)	32
Figura 8. Ilustración de <i>Populus</i> sp. diferenciando entre los clones estudiados: <i>Populus x interamericana</i> y <i>Populus x euramericana</i>	56

Figura 9. Ilustración de <i>Chenopodium quinoa</i> Willd.	60
Figura 10. Ilustración de <i>Annona cherimola</i> Mill.	65

- Resumen -

Dado el actual estado de alarma e incertidumbre en lo referente a la quema de combustibles fósiles como principal fuente de energía, las políticas y acuerdos mundiales se centran en restringir su uso con el propósito de reducir en el horizonte 2050 hasta en un 55% su consumo y sus emisiones contaminantes derivadas respecto a 1990. En este contexto, la biomasa se presenta como una fuente de energía renovable y con huella neutra de carbono que debe de continuar siendo investigada y desarrollada.

De este modo, la presente tesis doctoral evalúa el comportamiento térmico de varias fuentes biomásicas lignocelulósicas. En concreto, el objetivo principal es estudiar y establecer valorizaciones energéticas comparativas entre un cultivo energético forestal propiamente dicho de *Populus* sp. y diferentes residuos procedentes del cultivo agrícola de dos especies en proliferación: la quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) y la chirimoya (*Annona cherimola* Mill.).

En lo referente al cultivo energético del chopo, se utilizó una parcela de cultivo de cuatro años de antigüedad compuesta por aproximadamente 1400 ejemplares de *Populus* sp. divididos en cuatro clones (UNAL, I-214, AF-2 y AF-8). Además, esta parcela de cultivo se dividió en tres tratamientos de fertilización diferentes: CONTROL (sin fertilización), BIOSOLIDS (fertilización orgánica mediante un lodo procedente de una estación depuradora de aguas residuales) y MUD (fertilización orgánica con un lodo procedente de una industria láctea). Los procesos termoquímicos estudiados fueron combustión, pirólisis y gasificación. De forma global pudo comprobarse que cada uno de los procesos térmicos reveló mejor comportamiento térmico para un tratamiento/clon diferente. Los análisis elementales, inmediato y de poder calorífico de esta biomasa concluyeron que la biomasa de chopo posee propiedades óptimas como combustible (HHV próximo a 20 MJ/kg). Además, el análisis de los perfiles termogravimétricos puso de manifiesto similitudes entre la combustión y gasificación, mostrando un patrón diferente en la pirólisis. Los índices térmicos corroboraron esta tendencia, ya que fueron más altos para la combustión, seguidos de gasificación y por último pirólisis.

Respecto a la quinoa, la práctica inexistencia de estudios que proporcionasen un valor a la parte no comestible de la planta (cascarilla y biomasa aérea) indujo a su posible valorización energética. Se aplicaron los procesos termoquímicos de combustión y pirólisis, en ambos casos

bajo tres rampas de calentamiento: 10, 20 y 40 K/min. Los análisis elementales, inmediato y de poder calorífico mostraron mejores propiedades combustibles de la biomasa aérea (HHV = 15,41 MJ/kg) respecto a la cascarilla (HHV = 12,70 MJ/kg). Los perfiles termogravimétricos y los índices térmicos obtenidos se vieron influenciados tanto por el proceso termoquímico utilizado como por la variación de temperatura y la composición de la biomasa. Los mejores resultados se alcanzaron a través de la combustión de la biomasa aérea para rampas rápidas de calentamiento. Estos datos fueron reconfirmados por los índices térmicos y el análisis estadístico.

Por último, el cultivo agrícola del chirimoya, además de proporcionar la deseada pulpa de la chirimoya, deja una cantidad considerable de residuos en forma de restos de madera de poda y de semillas tras el procesado industrial de las frutas, ambos aptos para su valorización energética. Se utilizaron dos parcelas de cultivo bajo diferente fertilización: M₁, con fertilizante mineral tradicional; y M₂, con fertilizante orgánico procedente de una explotación ganadera vacuna. El proceso termoquímico llevado a cabo fue combustión, bajo cuatro rampas de calentamiento diferentes: 5, 10, 20 y 40 °C/min. Independientemente del fertilizante utilizado, las semillas presentaron mejores propiedades combustibles (HHV = 24,78 MJ/mol) que la madera de poda (HHV = 19,33 MJ/mol). Sin embargo, los perfiles termogravimétricos revelaron que mientras que las muestras de semillas sólo estuvieron influenciadas por la variación de temperatura, las de madera además estuvieron influenciadas por el fertilizante aplicado. Esta influencia del fertilizante usado sobre el comportamiento térmico de los residuos de chirimoya fue corroborada, a su vez, por los índices cinéticos donde el abono orgánico disminuyó las energías de activación de todas las muestras, especialmente las de semillas.

- **Palabras Clave:** chirimoya, chopo, combustión, fertilizante, gasificación, pirólisis, quinoa, residuos y termogravimetría.

- Abstract -

Given the current state of alarm and uncertainty regarding the burning of fossil fuels as the main source of energy, global policies and agreements are focused on limiting their use in order to reduce their consumption and their pollutant emissions by up to 55% by 2050, compared to 1990. In this context, biomass is a renewable and carbon neutral energy source that must continue to be researched and developed.

Thus, this doctoral thesis evaluates the thermal behaviour of several lignocellulosic biomass sources. Specifically, the main objective is to study and establish comparative energy recoveries between a forest energy crop of *Populus* sp. and different residues from the proliferating cultivation of two species: quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and custard apple (*Annona cherimola* Mill.).

Regarding poplar energy crop, a four-year-old plot composed of approximately 1400 specimens divided into four *Populus* sp. clones (UNAL, I-214, AF-2 and AF-8) was used. In addition, this crop was divided into three different fertilization treatments: CONTROL (without fertilization), BIOSOLIDS (organic fertilization using sludge from a wastewater treatment plant) and MUD (organic fertilization with sludge from a dairy industry). The thermochemical processes studied were combustion, pyrolysis, and gasification. Globally, it was possible to verify that each of the thermal processes revealed better thermal behaviour for a different treatment/clone. The elemental, proximal and calorific value analyses of this biomass concluded that poplar biomass has optimal properties as a fuel (HHV value close to 20 MJ/kg). In addition, the analysis of the thermogravimetric profiles showed similarities between combustion and gasification processes, showing a different pattern in pyrolysis process. The thermal indexes corroborated this trend, showing highest values for combustion, followed by gasification and pyrolysis.

Concerning quinoa, the practical non-existence of studies that provided a value to the inedible part of the plant (husk and aerial biomass) induced its energy recovery. The thermochemical processes of combustion and pyrolysis were applied, in both cases under three heating rates: 10, 20 and 40 K/min. The elemental, proximal and calorific value analyses showed better fuel properties of the aerial biomass (HHV = 15,41 MJ/kg) with respect to the husk (HHV = 12,70 MJ/kg). The thermogravimetric profiles and the thermal indexes obtained

were influenced by the thermochemical process used and by the temperature variation and biomass composition. The best results were achieved through the combustion of aerial biomass under rapid heating ramps (40 K/min). These data were reconfirmed by thermal indexes and statistical analysis.

Finally, the farming of custard apple. In addition to providing the desired cherimoya pulp, leaves a considerable amount of waste in the form of pruning Wood remains and seeds after the industrial processing of the fruits, both suitable for energy recovery. Two cultivation plots under different fertilization were used: M₁, with traditional mineral fertilizer; and M₂, with organic fertilizer from cow manure. The thermochemical process carried out was combustion, under four different heating rates: 5, 10, 20 and 40 °C/min. Regardless of the fertilizer used, the seeds presented better fuel properties (HHV = 24,78 MJ/mol) than the pruning Wood (HHV = 19,33 MJ/mol). However, the thermogravimetric profiles revealed that while seed samples were only influenced by the temperature variation, the Wood samples were also influenced by the applied fertilizer. This influence of the fertilizer used on the thermal behaviour of custard apple residues was corroborated, in turn, by the kinetic indexes, with the organic fertilizer decreasing the activation energies of all the samples, especially those of the seeds.

- **Keywords:** cherimola, combustion, fertilization, gasification, poplar, pyrolysis, quinoa, remains and thermogravimetry.

- Listado De Abreviaturas -

Abreviatura	Significado
A o k_0	Factor de Frecuencia o pre-exponencial
AF-2	Muestra de clon de chopo italiano <i>Populus x euramericana</i>
AF-8	Muestra de clon de chopo italiano <i>Populus x euramericana</i>
AIM	Método Aproximado Integral
B_i	Índice de combustión de Burnout
BIOSOLIDS	Tratamiento basado en la fertilización con lodo deshidratado procedente de depuradora
CCF o S	Factor de Combustión Característico.
CCI	Índices Característicos de la Combustión.
CE	Celulosa
CONTROL	Tratamiento sin fertilización
D	Índice de Desvolatilización
D_f	Índice de Burnout
D_i	Índice de Ignición
DTG	Termogravimetría derivada
DTG_{max}	Valor máximo alcanzado de un perfil DTG
E_a	Energía de activación
EDAR	Estación Depuradora de Aguas Residuales
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FC	Carbono fijado
FWO	Método isoconversional de Flynn-Wall-Dzawa
GEI	Gases de Efecto Invernadero
G_i	Índice de gasificación
HCE	Hemicelulosa
HHV o PCS	Poder Calorífico Superior
I-214	Muestra de clon de chopo español <i>Populus x euramericana</i>
k	Constante de velocidad
KAS	Método isoconversional de Kissinger-Akahira-Sunose
LARECOM	Laboratorio Regional de Combustibles
LHV o PCI	Poder Calorífico Inferior
LI	Lignina
LTI	Laboratorio de Técnicas Instrumentales
M_1	Parcela Casarabonela
M_2	Parcela Tolox
MC	Contenido en humedad

MUD	Tratamiento basado en la fertilización con lodo procedente de una industria láctea
P_i	Índice Pirolítico
R	Constante universal de los gases
R²	Coefficiente de correlación
SC	Muestra de semillas bajo fertilización orgánica
SD	Desviación Estándar
SM	Muestra de semillas bajo fertilización mineral
STP	Planta de tratamiento de aguas residuales.
T	Temperatura
T₀	Valor de temperatura a la que comienza un pico determinado en un perfil DTG
T_{DTGmax}	Valor de la temperatura asociado a DTGmax.
t_e	Tiempo de gasificación.
T_e	Temperatura de Ignición
T_f	Valor de temperatura a la que se alcanza el final de un pico determinado en un perfil DTG
TG	Termogravimetría
T_g	Temperatura de gasificación
TGA	Análisis termogravimétrico
t_p	Momento (min) en el que se produce el máximo pico de gasificación.
T_p	Temperatura asociada a la pirólisis
UNAL	Muestra de clon de chopo español <i>Populus x interamericana</i>
VM	Materia Volátil
WC	Muestra de madera de poda bajo fertilización orgánica
WM	Muestra de madera de poda bajo fertilización mineral
α	Grado de conversión

- Capítulo 1. Presentación -

- Presentación -

Justificación De Las Unidades Temáticas.

El desarrollo económico, social, tecnológico y político alcanzado a lo largo de la historia de la humanidad ha arrastrado al planeta a una deuda energética y ambiental. Esta deuda está fundamentada en más de 200 años de quema de combustibles fósiles y sus derivados y cuya amortización resulta cada vez más urgente (Jimeno and González, 2022). Lejos de mejorar la situación, a medida que la población mundial crece, la demanda de energía aumenta de forma proporcional (Yang et al., 2021) y se estima que, a este ritmo, aunque solo hay un planeta Tierra, en 2050 se necesitarán recursos por valor equivalente a tres planetas (Galli et al., 2015). Teniendo en cuenta que los combustibles fósiles son finitos en cantidad, no renovables y se prevé su agotamiento en aproximadamente 50 años (Holechek et al., 2022), asegurar el suministro continuo de energía se plantea como un reto cuya solución pasa por las energías renovables. Desde hace décadas se han explorado diferentes fuentes de energía renovable, como la energía eólica, solar, hidroeléctrica, geotérmica y biomásica (Bhatia et al., 2021). La biomasa es el recurso renovable más abundante disponible en la Tierra (Liu et al., 2019) y se postula como el camino hacia un sistema energético más sostenible (Bilgili et al., 2017).

Se entiende por cultivo energético aquel que se establece únicamente con el fin de obtener biomasa aprovechable para la obtención de energía (García-Luna, 2015). En el **Capítulo 5** se presenta la publicación relacionada con el establecimiento y posterior estudio de un cultivo energético de chopo (*Populus* sp.). Tradicionalmente se han utilizado especies de ciclo corto como el chopo en los cultivos energéticos dado que se obtienen cantidades considerables de biomasa en un periodo relativamente corto de tiempo (Stolarski et al., 2019; Fuertes et al., 2021; Alesso et al., 2021). En este caso se utilizaron cuatro clones del género *Populus* sp., dos de procedencia española (UNAL e I-214) y dos de procedencia italiana (AF-2 y AF-8). Los cuatro fueron sometidos a tres procesos termoquímicos diferentes, pirólisis, gasificación y combustión, con el fin de buscar y establecer diferencias entre estos procesos de transformación de energía. Además, es sabido que la fertilización de estos cultivos es un factor importante que puede limitar su producción (Paris et al., 2018). Aunque de mayor rendimiento, los fertilizantes inorgánicos suponen costes elevados y pueden producir

contaminación del suelo y aguas (Diacono and Montemurro, 2011) por lo que se añadieron dos tipos de fertilizantes orgánicos: un lodo deshidratado procedente de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) y un lodo líquido procedente de la planta de tratamiento de aguas residuales de una industria láctea. Aunque su rendimiento es levemente inferior comparado con los inorgánicos (Kaushal and Umrao, 2019) el uso de estos fertilizantes permite dar una “segunda vida” a residuos que de otro modo difícilmente serían aprovechables.

Al margen de los cultivos energéticos, los residuos procedentes de la agricultura constituyen una importante fuente de biomasa lignocelulósica (Rose, 2022). Su alta disponibilidad, junto con la tecnología y los conocimientos técnicos oportunos brindan la oportunidad de reconducir su fatal destino y obtener a partir de ellos nuevos materiales y bioproductos de valor energético agregado (Fernando et al., 2018). En los **Capítulos 6 y 7** se recogen las publicaciones referentes al estudio del comportamiento energético de los residuos de dos especies agrícolas: la quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) y la chirimoya (*Annona cherimola* Mill.). Se trata de dos especies de origen ancestral que debido a su capacidad de adaptación (Akram et al., 2021) y las propiedades de sus frutos (Lin et al., 2019; Razura-Carmona et al., 2021) están actualmente creciendo en popularidad. Sin embargo, una vez cosechadas las partes aptas para el consumo, los residuos como la paja, las semillas, las cáscaras y los restos de poda se acumulan a la espera de ser gestionados convenientemente. La valorización energética mediante diferentes condiciones atmosféricas da una segunda oportunidad a estos residuos al mismo tiempo que se contribuye a hacer frente a la demanda creciente de energía. Además, en este caso también se hizo una comparativa entre el comportamiento de los residuos en función del tipo de fertilizante aplicado: orgánico (abono de vaca) o inorgánico.

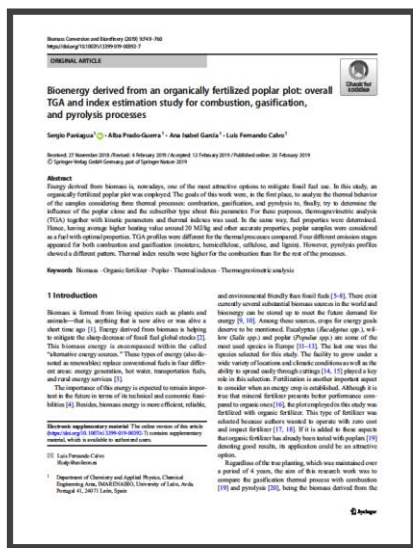
Referencias Bibliográficas

- Akram, M. Z., Basra, S. M. A., Hafeez, M. B., Khan, S., Nazeer, S., Iqbal, S., Saddiq, M. S. y Zahra, N. (2021). Adaptability and yield potential of new quinoa lines under agro-ecological conditions of Faisalabad-Pakistan. *Asian Journal of Agriculture and Biology*, 2, 202005301. <https://doi.org/10.35495/ajab.2020.05.301>
- Alesso, S. P., Tapias, R., Alaejos, J. y Fernández, M. (2021). Biomass Yield and Economic, Energy and Carbon Balances of *Ulmus pumila* L., *Robinia pseudoacacia* L. and *Populus× euroamericana* (Dode) Guinier Short-Rotation Coppices on Degraded Lands under Mediterranean Climate. *Forests*, 12(10), 1337. <https://doi.org/10.3390/f12101337>
- Bhatia, S.K., Mehariya, S., Bhatia, R.K., Kumar, M., Pugazhendhi, A., Awasthi, M.K., Atabani, A. E., Kumar, G., Kim, W., Seo, S. y Yang, Y.H. (2021). Wastewater based microalgal biorefinery for bioenergy production: Progress and challenges. *Science of the Total Environment*, 751, 141599. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141599>
- Bilgili, F., Koçak, E., Bulut. Ü. y Kuşkaya, S. (2017). Can biomass energy be an efficient policy tool for sustainable development? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 830–845. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.109>
- Diacono, M. y Montemurro, F. (2011). Long-term effects of organic amendments on soil fertility. *Sustainable agricultura*, 2, 761-786. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0394-0_34
- Fernando, A. L., Costa, J., Barbosa, B., Monti, A. y Rettenmaier, N. (2018). Environmental impact assessment of perennial crops cultivation on marginal soils in the Mediterranean Region. *Biomass and Bioenergy*, 111, 174-186. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.04.005>
- Fuertes, A., Oliveira, N., Cañellas, I., Sixto, H. y Rodríguez-Soalleiro, R. (2021). An economic overview of *Populus* spp. in Short Rotation Coppice systems under Mediterranean conditions: An assessment tool for decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111577>
- Galli, A., Lin, D., Wackernagel, M., Gressot, M. y Global, S. W. (2015). Brief for GSDR 2015 Humanity's growing Ecological Footprint: Sustainable development implications. *Global Footprint Network*.
- García-Luna, A. (2014). *Infraestructuras para establecer la implantación de cultivos*. Paraninfo.
- Holechek, J. L., Geli, H. M., Sawalhah, M. N. y Valdez, R. (2022). A global assessment: can renewable energy replace fossil fuels by 2050? *Sustainability*, 14(8), 4792. <https://doi.org/10.3390/su14084792>
- Jimeno, C. L. y González, C. M. (2022). Las materias primas minerales y la transición energética. *Cuadernos de estrategia*, 209, 61-174.
- Kaushal, G. S. y Umrao, R. (2019). Effect of organic and inorganic fertilizer on yield of linseed (*Linum usitatissimum* L.) under poplar based agroforestry system. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8(6), 809-811. <https://doi.org/10.5958/2455-7129.2019.00008.6>
- Lin, M., Han, P., Li, Y., Wang, W., Lai, D. y Zhou, L. (2019). Quinoa secondary metabolites and their biological activities or functions. *Molecules*, 24(13), 2512. <https://doi.org/10.3390/molecules24132512>
- Liu, X., Duan, X., Wei, W., Wang, S. y Ni, B. J. (2019). Photocatalytic conversion of lignocellulosic biomass to valuable products. *Green chemistry*, 21(16), 4266-4289.
- Paris, P., Di Matteo, G., Tarchi, M., Tosi, L., Spaccino, L. y Lauteri, M. (2018). Precision subsurface drip irrigation increases yield while sustaining water-use efficiency in Mediterranean poplar bioenergy plantations. *Forest Ecology and Management*, 409, 749-756. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.12.013>
- Razura-Carmona, F. F., Montalvo-González, E., Ramírez-Mares, M. V., Bueno-Durán, A. Y., Sáyago-Ayerdi, S. G., Gasga, V. Z. y Sánchez-Burgos, J. A. (2021). Antioxidant capacity, antitopoisomerase activity and secondary metabolites identification in extracts of Cherimoya pulp (*Annona cherimola* Mill). *Revista BioCiencias*, 8, 14. <https://doi.org/10.15741/revbio.08.e1165>

- Rose, P. K. (2022). Bioconversion of agricultural residue into biofuel and high-value biochemicals: Recent advancement. En: Y. K. Nandabalan, V. K. Varg, N. K. Labhsetwar y A. Singh (Eds.) *Zero Waste Biorefinery* (pp. 233-268). Springer Nature Singapore.
- Stolarski, M. J., Krzyżaniak, M., Warmiński, K., Olba-Zięty, E., Penni, D. y Bordiean, A. (2019). Energy efficiency indices for lignocellulosic biomass production: Short rotation coppices versus grasses and other herbaceous crops. *Industrial Crops and Products*, 135, 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.04.022>
- Yang, X., Pang, J., Teng, F., Gong, R. y Springer, C. (2021). The environmental co-benefit and economic impact of China's low-carbon pathways: Evidence from linking bottom-up and top-down models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136, 110438. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110438>

- Resumen De Las Publicaciones -

La presente tesis doctoral se presenta por compendio de publicaciones. Todas ellas pertenecen a revistas indexadas en el JCR y están relacionadas con lo referente a la valorización energética de biomasa lignocelulósica procedente de diferentes fuentes (cultivos energéticos forestales y residuos de cultivos agrícolas). Seguidamente se exponen las publicaciones resultado de esta tesis, que serán a su vez desarrolladas ampliamente en los posteriores **Capítulos 5, 6 y 7**.

Capítulo 5.

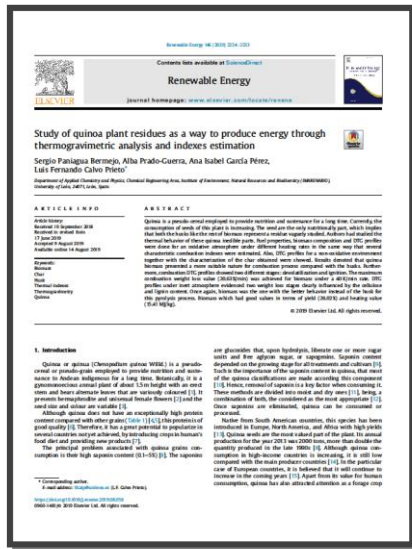
Título.- “Bioenergy derived from an organically fertilized poplar plot: overall TGA and index estimation study for combustion, gasification and pyrolysis processes”

Revista.- *Biomass Conversion and Biorefinery* (2019) 9: 749-760. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00392-7>. Q2 (IF= 2.602). 64/143, Engineering, Chemical. 6 citations (14.03.2023).

Autores.- S. Paniagua, A. Prado-Guerra, A. I. García, L. F. Calvo.

Breve reseña.- A partir del estudio de las propiedades combustibles de biomasa procedente de un cultivo energético forestal de chopo (*Populus* sp.), así como del análisis de los perfiles termogravimétricos obtenidos y los índices térmicos calculados, se consiguió valorizar energéticamente esta fuente de biomasa mediante los procesos termoquímicos de combustión, pirólisis y gasificación, permitiendo establecer comparaciones entre ellos.

Capítulo 6.



Título.- “Study of quinoa plant residues as a way to produce energy through thermogravimetric analysis and indexes estimation”

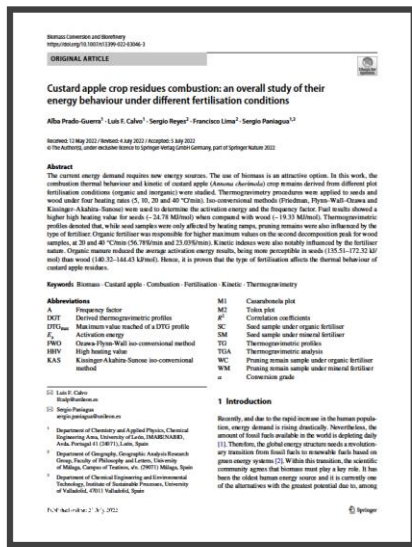
Revista.- *Renewable Energy* (2020) 146: 2224-2233.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.056>. Q1 (IF= 8.001).
 21/133, Energy&Fuels. 23 citations (14.03.2023).

Autores.- S. Paniagua, A. Prado-Guerra, A. I. García, L. F. Calvo.

Breve reseña.- Motivado por la falta de aplicaciones de las

partes no comestibles de la quinoa (cascarilla y biomasa aérea) se propició su valorización energética mediante los procesos de combustión y pirólisis. El estudio posterior de los resultados se realizó mediante termogravimetría y se simplificó su análisis cinético gracias al cálculo de los índices térmicos asociados.

Capítulo 7.



Título.- “Custard apple crop residues combustion: an overall study of their energy behaviour under different fertilisation conditions”

Revista.- *Biomass Conversion and Biorefinery* (2022).
<https://doi.org/10.1007/s13399-022-03046-3>. Q2 (IF= 4.987).
 64/160, Engineering, Chemical. 0 citations (14.03.2023).

Autores.- A. Prado-Guerra, L. F. Calvo, S. Reyes, F. Lima, S. Paniagua.

Breve reseña.- La valorización energética por combustión

de la madera de poda procedente del cultivo agrícola del chirimoyo, así como de las semillas de las frutas tras su procesado industrial, permite su gestión sostenible. Además del análisis termogravimétrico, se realizó el estudio cinético mediante métodos isoconversionales y se buscó la presencia de diferencias en función del modo de fertilización de las parcelas (fertilizantes mineral y orgánico).

- Capítulo 2. Introducción -

- Introducción -

Necesidad En La Búsqueda De Nuevos Combustibles En Detrimento De Los Combustibles Fósiles.

'*There is no planet B*'. Aquellas palabras que el filósofo y médico inglés John Locke (1632-1704) mencionó en su día y que tres siglos después se han convertido en un lema que recorre el mundo para salvarlo. Un grito común que aúna las fuerzas de millones de jóvenes de todas las procedencias con un único objetivo: reclamar acciones urgentes frente al cambio climático.

Lo que comenzó como una protesta infantil de la adolescente sueca Greta Thunberg (2003 -) cuando tan solo tenía 15 años, fue creciendo vertiginosamente con el movimiento '*Fridays For Future*' a mediados de 2018 hasta la actualidad, con múltiples protestas celebradas en países de todo el mundo y una concienciación global, sobre todo en los jóvenes, sobre la problemática ambiental a la que se debe de hacer frente.

El sistema energético mundial es uno de los causantes, sino el principal, de esta situación. La energía es la única moneda de cambio universal: todo lo que conocemos es gracias a la transformación de energía, pero ¿qué es? Aparentemente una pregunta sencilla a la que ni el considerado por muchos como padre de la energía Vaclav Smil (1943 -) responde de forma contundente. En su libro "*Energía y Civilización*" (2021) se escuda en la invisibilidad de tal fuerza para excusar la falta de una definición completa. Sin embargo, lo que sí confirma y reafirma es que toda la materia está compuesta por energía en reposo y que se manifiesta de múltiples formas.

Es tal la importancia de la energía que la historia del ser humano ha estado siempre supeditada a ella. Que el *Homo erectus* descubriera el fuego hace aproximadamente 1 millón de años distanció a aquellas mujeres y hombres primitivos de los comportamientos más animales e indujo su asentamiento. La quema de las plantas fue aportando el calor necesario para cocinar y sobrevivir a las inclemencias del tiempo, favoreciendo la humanización hasta conseguir combustiones controladas en hornos y estufas que proporcionaron innumerables productos, como ladrillos cocidos y metales fundidos. El comienzo de la quema de combustibles fósiles aceleró aún más todo este proceso, hasta el punto de conseguir la tecnología necesaria para transformar la energía térmica en energía mecánica. Desde 1882 se

ha generado electricidad a partir de combustibles fósiles, momento clave que supuso el despegue imparable del desarrollo de la civilización tal y como se conoce hoy en día.

Sin embargo, el consumo desmedido de combustibles fósiles ha supuesto prácticamente su agotamiento y ha abocado al planeta a consecuencias ambientales tan graves que las sociedades presentes y futuras solo podrán garantizar su supervivencia si llevan a cabo una transición hacia fuentes de energía no fósiles.

Esto que puede parecer como un problema inmediato y actual, ha sido realmente avisado por los científicos desde hace décadas. Así, por ejemplo, en 1956 el geofísico estadounidense Marion King Hubbert (1903-1989) postuló uno de los avisos más escalofriantes sobre la disponibilidad finita del petróleo, extrapolable al carbón y gas natural. Analizando la relación entre el descubrimiento de nuevos yacimientos y el ritmo en que eran explotados, estableció lo que adquirió el nombre de Teoría del Pico de Hubbert que predice que la producción de petróleo llegará a su cénit y su disponibilidad descenderá tan rápido como creció (forma de campana de Gauss). Incluso ha sido un tema que ha saltado a la gran pantalla, dando lugar a grandes producciones cinematográficas de Hollywood como *Mad Max* (George Millar, 1981) o *Interstellar* (Christopher Nolan, 2014). Sin embargo, la sociedad ha estado demasiado ocupada desarrollándose a un ritmo frenético. Y es que en este punto hay que romper una lanza a favor de los combustibles fósiles ya que sin ellos quizá no habría sido posible el desarrollo tecnológico alcanzado tan solo a lo largo del siglo XX.

Tampoco sirvieron de mucho las crisis del petróleo de los años 70, en las que el mundo consumía petróleo de forma masiva y su dependencia con este combustible era prácticamente total. Como consecuencia de la inestabilidad política, de la presencia de guerras y por la elevación de la inflación, el precio del barril se encareció dramáticamente, comenzando cortes en el suministro y dejando el planeta sumido en una profunda crisis económica.

Lo cierto es que, si se hace una comparativa con el actual modelo económico, no dista mucho de aquel entonces. Actualmente el mundo se está enfrentando a una gran inestabilidad política, con intereses y guerras que han aumentado la incertidumbre en el precio y suministro de los combustibles fósiles, aún principal fuente de energía a nivel mundial.

En este contexto, es de vital importancia y necesidad la investigación y desarrollo de energías renovables que, además de constituir una alternativa a los combustibles fósiles, aseguren la protección ambiental y disminuyan la dependencia energética.

Se entiende por **energía renovable** aquella que deriva de procesos naturales que se reponen constantemente, es decir, la que procede de las continuas corrientes de energía recurrentes en el entorno natural (Krishan and Suhag, 2019; Murillo and Nevarez, 2021).

El sol es el origen de la mayoría de las fuentes de energía renovables que hoy en día están disponibles. La radiación solar es responsable de los sistemas climáticos mundiales, y por tanto motor indirecto de la energía solar, eólica, hidráulica, mareomotriz y biomásica. En el planeta Tierra incide una cantidad de energía solar que es, aproximadamente, cuatro órdenes de magnitud mayor que la tasa actual de combustibles fósiles y nucleares (Salvador, 2010), asegurando el carácter infinito de estas fuentes de energía alternativas.

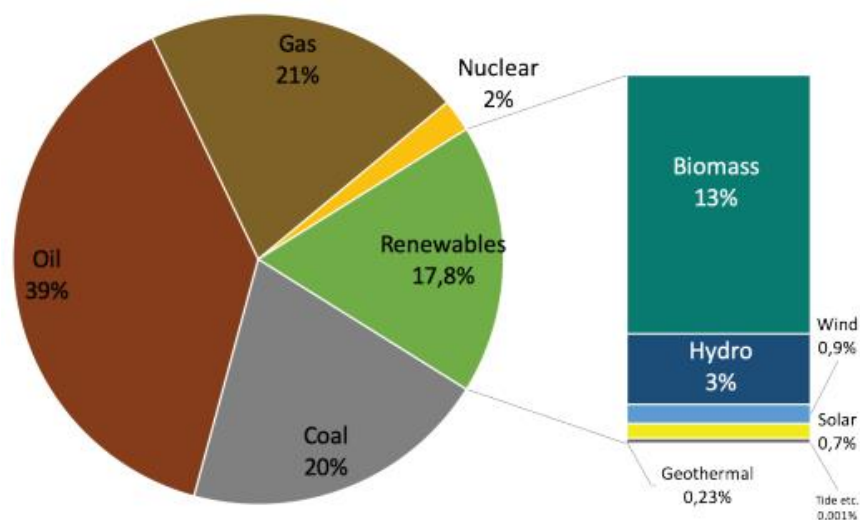


Figura 1. Consumo mundial total de energía en 2017 (Agencia Internacional de la Energía, IEA, 2019).

De entre ellas, la biomasa es la fuente de energía renovable más utilizada, posicionándose como cuarta fuente de energía primaria, inmediatamente por detrás de los combustibles fósiles (**Figura 1**). Así, por motivos medioambientales y con el objetivo común de disminuir la dependencia energética, la biomasa se postula como seria candidata en la sustitución de los combustibles tradicionales (petróleo, carbón y gas natural) ya que, aunque estas energías no renovables dominan todavía los mercados energéticos, el futuro de la energía es renovable (**Figura 2**).

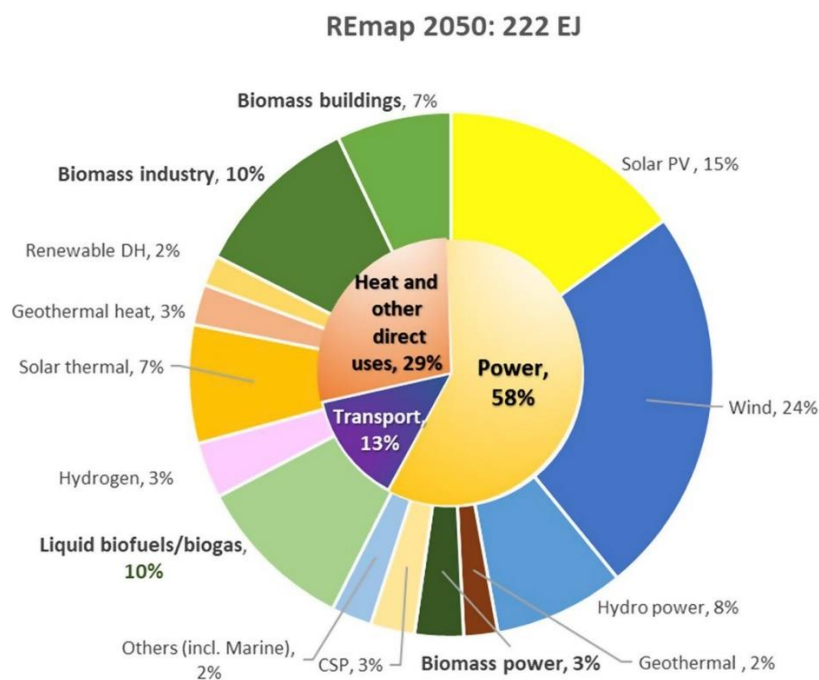
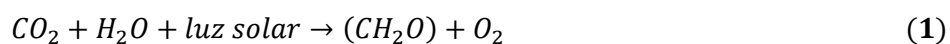


Figura 2. Hoja de ruta para la Energía Renovable (REmap) 2050. Desglose del uso de energías renovables en términos de consumo total de energía a nivel mundial (Agencia Internacional de las Energías renovables, IRENA, 2019).

La Biomasa Como Combustible.

Biomasa es un término general aplicable a toda la materia viva, y sus derivados, presente en la Tierra (Sherwood, 2020). Focalizado en el ámbito energético, se designa con el nombre de biomasa al conjunto heterogéneo de materias orgánicas, tanto por su origen como por su naturaleza y composición, que puede emplearse para obtener energía alternativamente a los combustibles fósiles (Salvador, 2010; Rozzi et al., 2020).

La biomasa utilizada para la producción de energía procede principalmente de tejidos vegetales como tallos y hojas (Demura and Ye, 2010) y de sustancias de reserva de las plantas, como sacarosa y almidón (Di Donato et al., 2019). Por tanto, esta fuente energética se basa en la utilización de la materia orgánica formada en un proceso biológico, la fotosíntesis (**Ecuación 1**).



A través de la fotosíntesis, las plantas al ser organismos autótrofos fijan el dióxido de carbono atmosférico (CO_2) junto con el agua disponible (H_2O), obteniendo la energía necesaria de la radiación solar, para dar lugar a compuestos de carbono (CH_2O) y la liberación de oxígeno (O_2).

El contenido energético de la biomasa reside en los enlaces químicos de los compuestos orgánicos formados, donde ha quedado almacenada parte de la energía solar. Así, la biomasa puede proporcionar energía mediante su transformación en materiales sólidos, líquidos y gaseosos para su posterior aprovechamiento en la generación de electricidad, el suministro de combustibles para vehículos y el suministro de calor para procesos industriales (Antar et al., 2019; Srivastava et al., 2021).

Debido a su rápida producción, cosecha y regeneración, así como por proporcionar productos aceptables desde un punto de vista ecológico, la biomasa es considerada una fuente renovable de energía (Amjith and Bavanish, 2022). Ciertamente, tras esta explicación queda claro que los combustibles fósiles, aunque están constituidos por materia orgánica y su origen es biológico, su producción y regeneración dependen de procesos geológicos en escalas temporales también geológicas por lo que quedan fuera del concepto de biomasa y de energía renovable (Fernández-González et al., 2015).

La producción de energía a partir de biomasa varía según el país, la disponibilidad de los recursos, la biodiversidad y el desarrollo económico y tecnológico disponible para su procesado (Naranjo, 2020). Aun así, se estima que la biomasa podrá proporcionar 3000 TWh de electricidad para 2050, reduciendo en 1,3 billones de toneladas la emisión de CO_2 a la atmósfera cada año (Gielen et al., 2019).

A falta de datos fiables y actualizados debido a la naturaleza informal y local de la mayor parte de la materia prima y la tecnología actualizada, puede afirmarse que en 2020 el suministro energético doméstico mundial a partir de biomasa fue de 57,5 EJ. El 86% de ese valor procedió de fuentes de biomasa sólidas, incluyendo astillas de madera, pellets y fuentes biomásicas tradicionales (World Bioenergy Association, WBA, 2022).

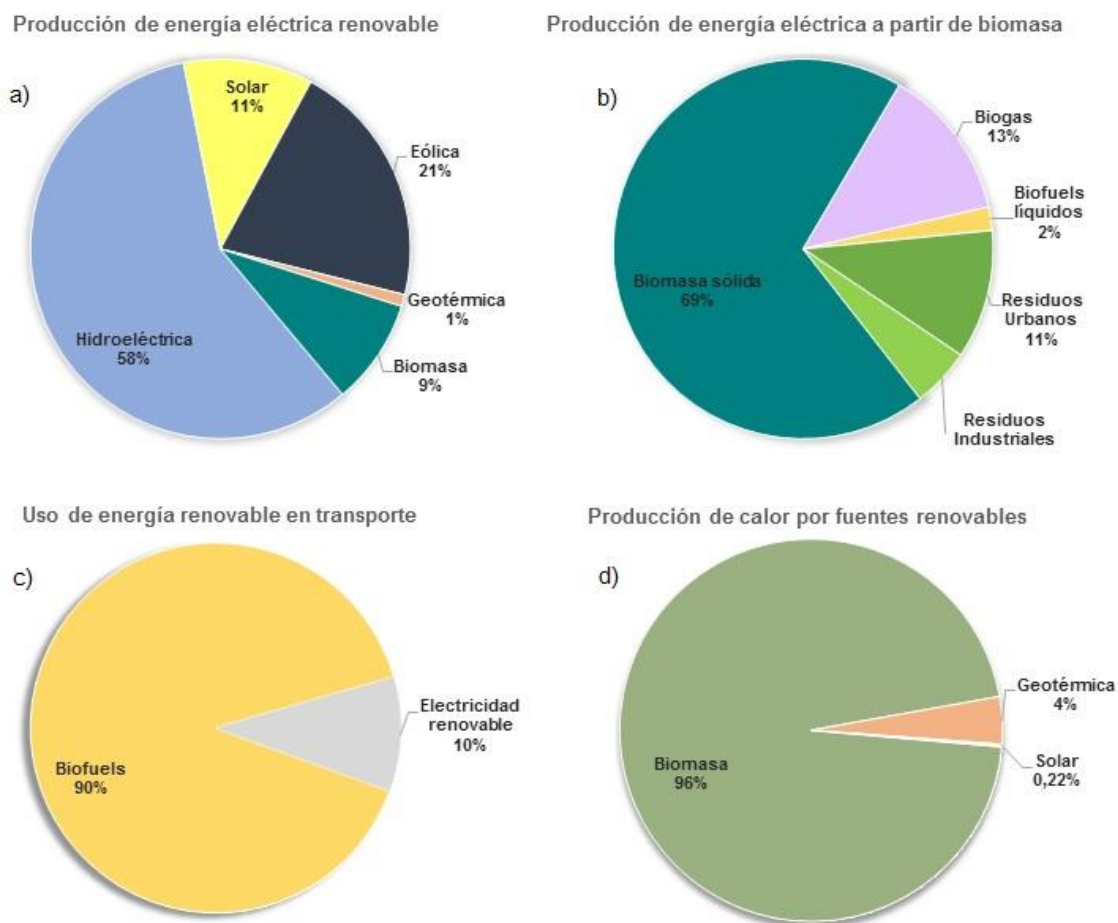


Figura 3. Estadísticas mundiales sobre energías renovables, y especialmente biomasa, en el año 2020 (WBA, 2022).

Se diferencian tres grandes campos en lo referente a la energía obtenida a partir de biomasa: la producción de electricidad, el desarrollo de métodos de transporte renovables y la producción de calor (**Figura 3**). En 2020 se generaron mundialmente 685 TWh de electricidad a partir de biomasa. A pesar de que en este sector de generación eléctrica la biomasa se posiciona como cuarta fuente de energía renovable (**Figura 3a**), es un valor que debe de ser considerado. Además, hay que tener en cuenta que el 69% de esa energía eléctrica procedió de biomasa sólida (**Figura 3b**) (WBA, 2022).

En cuanto al desarrollo de métodos de transporte renovables, en 2020, 4,23 EJ de energía renovable fue empleada mundialmente en el sector transportes, donde los biofuels líquidos y gaseosos derivados de procesos de conversión energética de la biomasa representaron el 90% de ese valor (**Figura 3c**) (WBA, 2022).

Aunque, sin duda, el sector en el que la biomasa destaca por su participación es la generación de calor (**Figura 3d**). La biomasa ha triplicado su participación en la producción mundial de calor en los últimos veinte años, llegando a representar hasta el 96% de todo el calor producido de forma renovable (**Tabla 1**). En 2020, 1,2 EJ del calor producido fue obtenido a partir de fuentes biomásicas, fundamentalmente de biomasa sólida (52 %) (WBA, 2022).

Tabla 1. Evolución de la cantidad de calor producido (TJ) a partir de biomasa a nivel mundial entre el año 2000 y el 2020 (WBA, 2022).

	Total	Residuos urbanos	Residuos industriales	Biomasa sólida	Biogas	Biofuels líquidos
2000	414 093	125 142	74 987	208 994	4 931	39
2005	530 683	152 968	82 712	284 689	6 616	3 698
2010	776 943	206 718	125 941	421 571	12 393	10 320
2015	949 134	263 338	138 693	509 620	33 032	4 451
2020	1 204 293	298 228	229 650	620 192	52 173	4 050

Composición De La Biomasa.

El desarrollo de la energía sostenible es esencial para paliar los problemas de la crisis energética y la contaminación ambiental (Pagano et al., 2023). En este sentido, la biomasa sólida destaca por su importante papel como materia prima para la obtención de energía baja en emisiones. Constituye un grupo muy diverso de materiales de origen vegetal que poseen estructuras tan diferentes como las presentes en semillas, hojas, ramas, tallos, raíces o frutos. En líneas generales, la biomasa sólida está constituida principalmente por distintas fracciones de hidratos de carbono, en función de las cuales se pueden diferenciar cuatro grandes tipos de biomasa: lignocelulósica, amilácea, azucarada u oleaginosa (Nogués et al., 2010). En este caso se centrará la atención sobre la biomasa lignocelulósica, compuesta fundamentalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, formando una estructura compleja e intrincada (Xie et al., 2019). Además, este material natural posee en su composición una cantidad variable de agua, extractos orgánicos y materia mineral (Sjöström, 1993). La composición final y la proporción de cada uno de estos componentes varían en función del origen y edad de la

planta, las condiciones edafológicas y climáticas, el tipo de cultivo (aplicación de fertilizantes, productos fitosanitarios, riego), etc. (Fernández-González et al., 2015). La biomasa lignocelulósica se localiza fundamentalmente en la paja de cereales, restos de poda forestal, algunos cultivos energéticos, serrín, virutas de industrias madereras, cáscaras de frutos, etc.

La lignocelulosa es un recurso potencial existente en la pared celular de las células vegetales (**Figura 4**). El valor de este componente está estrechamente relacionado con sus tres componentes estructurales principales: celulosa (40-60% en peso), hemicelulosa (20-40% en peso) y lignina (15-25% en peso). La celulosa es un homopolisacárido de cadena lineal formado por unidades de D-glucosa (entre 500 y 10000 unidades) unidas por enlaces β -1,4-glucosídicos y ha representado un papel fundamental en el desarrollo de la especie humana desde la antigüedad al constituir la base de materiales de construcción, vestimenta y en la industria química, entre otros (Liang et al., 2022).

La hemicelulosa es el heteropolisacárido natural compuesto principalmente por entre 100 y 500 unidades de pentosas (D-xilosa y L-arabinosa), hexosas (D-manosa, D-glucosa y D-galactosa), ácido glucurónico y residuos de ácido galacturónico. Las unidades monoméricas se unen entre sí, de nuevo, por enlaces glucosídicos β (1-4), formando en este caso estructuras lineales más ramificadas y de menor peso molecular que la celulosa (Mamman and Lee, 2008).

La fracción de lignina se caracteriza por ser un material polifenólico amorfo generado por la unión de entre 60 y 200 unidades de tres monómeros fenil-propánicos (alcohol coniferílico, alcohol sinapílico y alcohol p-cumarílico) mediante enlaces éter y C-C, dando lugar a una estructura tridimensional altamente ramificada. Dicho polímero posee una gran variedad de grupos funcionales, dianas naturales de múltiples interacciones biológicas y químicas, convirtiéndose en el único recurso renovable conocido que contiene grupos aromáticos en su composición (Wang et al. 2009). Sin embargo, su contenido en oxígeno es muy inferior (20-25%) respecto al de los otros dos polisacáridos estructurales principales ($\pm 49\%$) (Fernández-González et al., 2015).

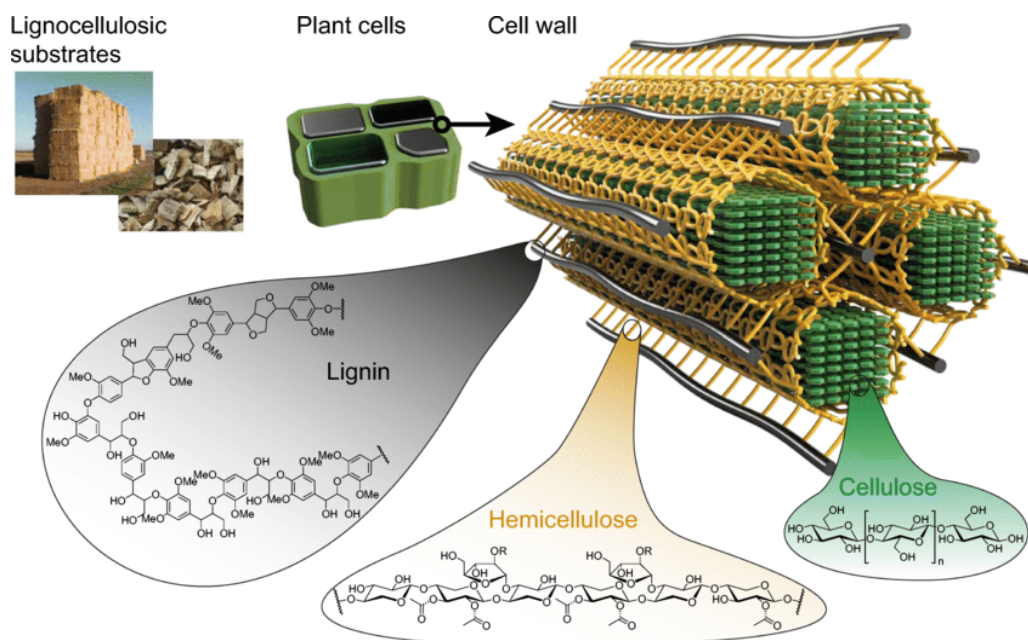


Figura 4. Componentes y estructura 3D simplificada de las paredes celulares vegetales lignocelulósicas (Brethauer et al., 2020).

Además, la biomasa lignocelulósica posee en su composición agua, extractos orgánicos y compuestos inorgánicos. La porción de agua presente (10-50%) puede estar en forma libre, rellenando los espacios extracelulares, o en forma ligada, en el interior de los orgánulos celulares o formando parte de estructuras moleculares. Por su función vital, los extractos orgánicos (alcaloides, lípidos, aceites esenciales, proteínas, ceras, carbohidratos, etc.) aportan a la biomasa (0-15%) características específicas de color, olor, resistencia mecánica, impermeabilidad al agua, etc. (Fernández-González et al., 2015). A su vez, la fracción mineral se caracteriza por su contenido significativo en sílice, metales alcalinos (sodio y potasio), metales alcalinotérreos (calcio y magnesio) y una menor proporción de hierro y manganeso, formando óxidos, silicatos, sulfatos, fosfatos, cloruros y carbonatos. La concentración de metales pesados presentes es ínfima (Sjostrom, 1993). Estos compuestos inorgánicos son generalmente conocidos como cenizas (Collard and Blin, 2014) y aunque generalmente su contenido es inferior al 1% del peso, en la biomasa leñosa de residuos herbáceos y agrícolas puede representar hasta el 15% en peso (Keown et al., 2005; Eom et al., 2011).

La composición estructural de la biomasa repercute directamente en el poder calorífico de la materia, siendo las muestras con altos porcentajes en lignina las que desprenden mayores cantidades de energía (Nogués et al., 2010).

Por tanto, uno de los rasgos más particulares de la biomasa lignocelulósica es su heterogeneidad que, junto con su contenido variable en humedad y baja densidad, hacen que este material tenga *per se* unas condiciones poco idóneas para su explotación energética directa. Así, muy frecuentemente, es necesario desarrollar procesos de pretratamiento y/o adecuación (normalmente densificado) con anterioridad a su uso como combustible (**Apartado “Procesos De Conversión Energética De La Biomasa.”**)

Procedencia De La Biomasa.

Existen multitud de criterios y nomenclaturas utilizados para clasificar los distintos tipos de biomasa existentes (**Figura 5**). Si nos centramos en cómo se obtiene, la clasificación más común es la que diferencia entre biomasa primaria y biomasa secundaria.

- Biomasa primaria: es aquella que se obtiene directamente de un ecosistema natural para su utilización energética. Se incluyen en este grupo, por tanto, todos los cultivos vegetales a partir de especies utilizadas específicamente para producir energía, tanto herbáceas, como por ejemplo los pastos energéticos, como forestales (Vargas et al., 2020).
- Biomasa secundaria: también denominada residual, es la obtenida como residuo o subproducto por la acción humana. Así, se incluyen en este grupo residuos de podas, paja, rastrojos, serrín, cáscaras, huesos, etc. (Charisiou et al., 2016).

Paralelamente, otras clasificaciones diferencian tres fuentes principales de recursos biomásicos en función de su procedencia: agrícola, forestal e industrial. Atendiendo, además, al modo de obtención, la biomasa agrícola y forestal puede ser primaria o secundaria, mientras que la industrial tan solo puede englobarse en biomasa secundaria.

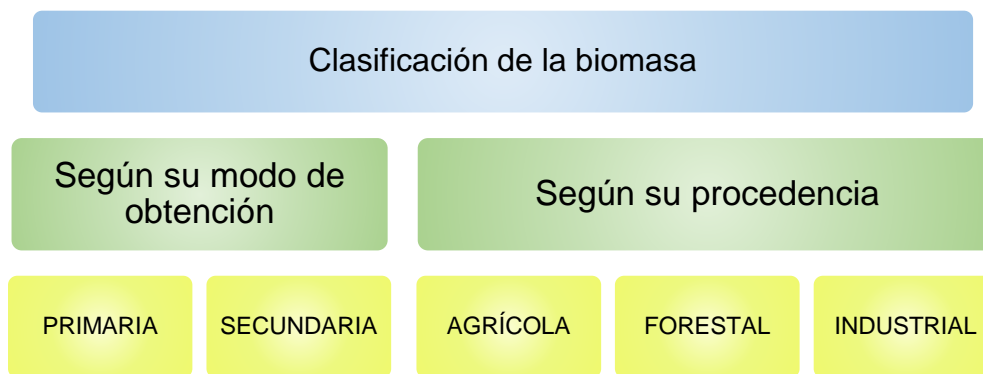


Figura 5. Tipos de biomasa en base a diferentes criterios.

Biomasa Agrícola.

Se corresponde con el cultivo de especies agrícolas específicas con fines únicamente energéticos, así como con los restos producidos por los cultivos herbáceos y leñosos de especies con otros propósitos iniciales, como la obtención de alimentos u otras materias primas.

Cada vez es más común el uso de especies agrícolas para el establecimiento de cultivos energéticos. Mención especial merece en este punto el sorgo azucarado que se postula entre las variedades más prometedoras como cultivo energético para producir bioetanol (Garolera et al., 2020) junto con la batata (Rizzolo et al., 2021), el maíz, el trigo (Mohanty and Swain., 2019) y la caña de azúcar (Khan et al., 2017). En la producción de biodiesel destaca el aceite de palma (Puah and Choo, 2008).

Sin embargo, en este apartado destacan por su magnitud los residuos procedentes de la actividad agrícola. Se corresponden con los remanentes de cultivos, es decir, de aquellas partes vegetales que no forman parte del producto cosechado como tal. Estos residuos poseen una variabilidad que depende de cada cultivo y de sus propiedades intrínsecas. Los cultivos agrícolas más importantes a nivel mundial son el cultivo de cereales (50% de la superficie cultivada), seguido por el cultivo de oleaginosas (16%) y forrajeras (13%). Los cultivos de árboles frutales, que aportan una cantidad importante de residuos leñosos tras las podas, alcanzan un 3,4% de la superficie mundial cultivada (Elias, 2012). De todos ellos, restando lo que queda en el campo o es usado para otros fines, unas 131 x 10⁶ toneladas de residuos agrícolas están disponibles solo en Europa cada año para la producción de biocombustibles,

y se estima que esta cifra se incremente a 139×10^6 toneladas para 2030 (Searle and Malins, 2013).

Biomasa Forestal.

Este tipo de biomasa procede de los tratamientos silvícolas y de mejora y mantenimiento de los montes y masas forestales. Sepa el lector que lo referente a los cultivos energéticos forestales se desarrollará de forma más amplia en el **Apartado “Cultivos Energéticos Tradicionales”**.

En cuanto a los residuos de biomasa forestal, de una manera análoga a los cultivos agrícolas, existe una importante variabilidad en su generación, ya que cada especie forestal posee características propias en cuanto a su estructura y crecimiento que condicionan la cantidad de biomasa disponible en los bosques.

La utilización de biomasa residual de origen forestal posee un potencial mayor en plantaciones, respecto a la procedente de bosques naturales donde a partir de cortas intermedias programadas se pueden extraer pequeños volúmenes (Velázquez-Martí, 2018).

La explotación de un bosque produce una cantidad de residuos importante, debido en gran parte a que una proporción razonable de cada árbol cosechado corresponde a secciones no aprovechables por la industria forestal y es abandonado habitualmente como residuo en los propios bosques. Esta biomasa leñosa se corresponde principalmente con ramas, hojas, acículas y secciones de diámetro menor que el tronco (Velázquez-Martí, 2018), y en su conjunto puede ser extraída del bosque y ser aprovechada como fuente de energía (Curbelo et al., 2021)

Además de su aprovechamiento energético, la limpieza de los suelos forestales se relaciona con otros beneficios y es que, durante ciertos meses al año, toda esta cantidad de materia orgánica abandonada en los boques puede inflamarse fácilmente por las altas temperaturas, transformándose en frecuentes incendios forestales y afectando seriamente a las condiciones edáficas y biológicas del lugar (FAO, 2019).

Biomasa Industrial.

Hace referencia a los productos y subproductos derivados del procesado industrial de biomasa, fundamentalmente, agrícola y forestal. Su composición es similar a la del material que les da origen y no se aprovechan habitualmente debido a que no son productos en sí, sino residuos.

Se entiende por residuo al subproducto resultante de una actividad determinada y cuyo valor económico es escaso o nulo al no suscitar en sí mismo un aprovechamiento económico y comercial (Nogués et al., 2010).

Los residuos industriales de base forestal son los originados principalmente en las industrias forestales madereras y del papel. Quedan diferenciados a su vez según su industria de origen en (FAO, 2019):

- Industrias de primera transformación: serrín, virutas, etc.
- Fabricación de productos de madera: serrín, recortes de tableros y demás materiales de las industrias de muebles y carpinterías.
- Fabricación de pastas celulósicas y derivados del papel.

Los residuos de la industria agrícola y agroalimentaria proceden de actividades industriales de transformación de alimentos. Se incluyen en este grupo, por ejemplo, los huesos de aceituna, las cáscaras de nuez o las pepitas de las uvas tras su procesado para obtener zumo.

Se estima que cada año se generan más de 180 mil millones de toneladas de residuos de biomasa lignocelulósica a partir de la industria agrícola y forestal (Dahmen et al., 2019). Su uso como fuente de energía tiene un alto potencial, considerando que son producidos de forma continua y en gran variedad de ambientes, ayudando en su gestión y evitando su quema descontrolada y poco eficiente (Rajesh Banu et al., 2021).

Procesos De Conversión Energética De La Biomasa.

Los procesos para la transformación energética de la biomasa se pueden englobar en tres grandes grupos: fisicoquímicos, bioquímicos y termoquímicos (**Figura 6**).

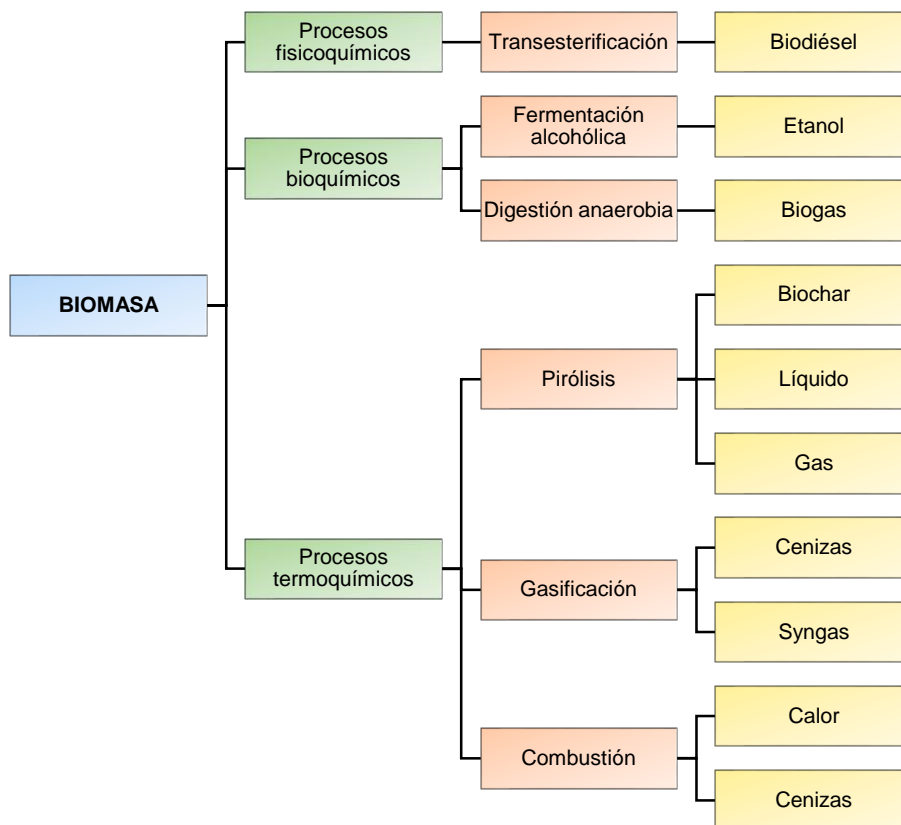


Figura 6. *Procesos de transformación energética de la biomasa relacionados con sus productos finales.*

Los procesos fisicoquímicos se aplican en especial para biomazas oleaginosas, cuyo contenido en aceite se obtiene por métodos físicos o químicos. Ese aceite es sometido a un proceso de acondicionamiento y a continuación a una transesterificación durante la cual se le hace reaccionar con un alcohol primario obteniéndose un biodiesel apto para motores de combustión.

Los procesos bioquímicos son llevados a cabo por la acción de microorganismos y enzimas. Están fuertemente influenciados por las condiciones ambientales (temperatura, pH, sustancias tóxicas, inhibidores, tiempo de contacto, etc.). Además, el tipo de microorganismo y la composición inicial de la biomasa van a definir los productos obtenidos. Los procesos bioquímicos más conocidos son la fermentación alcohólica y la digestión anaeróbica.

Los denominados procesos termoquímicos se eligen sobre todo para biomasa lignocelulósica, que es sometida a altas temperaturas produciendo la oxidación total o parcial de sus componentes con su correspondiente liberación de energía. Esta energía puede ser en forma

de combustibles intermedios, como en la pirólisis y la gasificación, o en forma de calor, como en la combustión.

Dado que la conversión de la biomasa sólida en energía se realiza fundamentalmente mediante procesos termoquímicos, éstos serán desarrollados de forma más extensa en el siguiente apartado específico (**Apartado “Formas De Aprovechamiento: Procesos Termoquímicos”**)

Sin embargo, antes de centrar la atención en qué consiste cada uno de ellos, es necesario mencionar que, debido a la heterogeneidad de la biomasa, antes de su aprovechamiento energético debe de ser sometida a tratamientos de adecuación que optimicen sus cualidades como fuentes de energía.

Dentro de los recursos biomásicos existe una gran variedad de tamaños, contenidos de humedad, presencia de productos no deseados (como arena o piedras), etc. que impiden su uso directo como combustibles. Es por ello que deben de pasar por una serie de pretratamientos, normalmente orientados a adecuar sus características físicas y raramente a modificar su composición química. Estos pretratamientos pueden aplicarse desde el momento de recolección de la biomasa, hasta su entrada en el sistema de transformación energética.

Aunque son técnicas aparentemente sencillas y que suponen un gasto extra en el proceso, los pretratamientos constituyen una fase clave ya que de ellos dependen la rentabilidad y capacidad del posterior aprovechamiento energético. Se enfocan en tres líneas de actuación:

1. *Densificación*. Los recursos biomásicos son fuertemente compactados a alta presión para obtener combustibles con mayor densidad aparente, y por tanto permite reducir los costes de transporte, almacenamiento y manejo (Padilla et al., 2019).

Según la compactación, los métodos de densificación se pueden clasificar en compactaciones de alta, media o baja presión. Los principales procesos de densificación son el pelletizado, el briquetado y el empacado (Ibitoye et al., 2021).

2. *Reducción de tamaño*. Consiste en la disminución del tamaño de las partículas para así aumentar su superficie específica. Los principales procesos implicados son el triturado, el astillado y la molienda. De cada uno de ellos se obtienen tamaños menores

de partícula. Las tecnologías disponibles para realizarlo son variables, desde sistemas de disgregación, trituradoras, astilladoras o molinos de diversos tipos en función del resultado final deseado.

3. *Reducción del contenido en humedad.* La biomasa sólida se caracteriza por tener un alto contenido de humedad, comprendido entre el 10% y el 60%, aunque varía en función de la especie, el momento de recolección, el tiempo de almacenamiento y las condiciones del mismo. Estos valores de humedad acarrear determinados inconvenientes (Nogués et al., 2010):

- Aumento del peso y volumen de la biomasa, y por ende de los costes de manipulación y transporte, sin aportar valor energético.
- Causa limitaciones en los procesos de densificación y reducción de granulometría, requiriendo más energía para conseguir el resultado final deseado.
- Disminución del rendimiento del proceso de conversión energética, puesto que gran parte de la energía en forma de calor es consumida para la evaporación del agua.

En este punto, cabe destacar que, en el caso de los procesos termoquímicos, los valores de humedad óptimos para la pirólisis y la combustión deben de ser menores del 10% (Salazar et al., 2021) y entre 25% y 30% para la gasificación (Lys et al., 2021).

- Incremento de la contaminación como consecuencia de procesos de conversión ineficientes, dando lugar a la producción de inquemados.

Dependiendo del agente involucrado, el secado de la biomasa puede realizarse de forma natural, amontonando la materia en pilas y dejando que el aire reduzca la humedad a favor del ambiente que le rodea; o bien de manera forzada mediante sistemas de secado industriales que implican un aporte de energía externo en forma de calor mediante el uso de maquinaria y tecnologías específicas.

Formas De Aprovechamiento: Procesos Termoquímicos.

La termoquímica es la parte de la termodinámica que trata de las variaciones térmicas que acompañan a las reacciones químicas (Patiño-Olivares, 2000). Focalizando el tema en la biomasa, se hace referencia con el término de **proceso termoquímico** a aquel en el que se consigue la transformación química de la biomasa tras someterla a altas temperaturas (300 °C – 1000 °C), consiguiendo el secado y liberación de sus compuestos volátiles, produciendo reacciones de descomposición de sus moléculas y reacciones entre los productos de la primera fase y la atmósfera que les rodea, logrando la obtención de unos productos finales que permiten su aprovechamiento energético.

Se habla principalmente de pirólisis, gasificación y combustión, y aunque son de la misma naturaleza y están íntimamente relacionados entre sí, las principales diferencias se recogen en la Tabla 2.

Tabla 2. Principales diferencias entre los procesos termoquímicos estudiados: combustión, pirólisis y gasificación.

	COMBUSTIÓN	PIRÓLISIS	GASIFICACIÓN
Atmósfera (Gas)	Oxígeno estequiométrico o superior	Inerte (sin oxígeno)	Oxígeno subestequiométrico
Temperatura máxima	1000 °C	500 - 600 °C	800 °C

Relacionado con el estudio de los procesos termoquímicos, son de gran importancia los parámetros cinéticos de las reacciones que en ellos se desarrollan. Para su determinación, de las múltiples técnicas y equipos posibles, en los próximos **Capítulos 5, 6, y 7** el lector debe de tener en cuenta que se ha usado el análisis de termogravimetría (TGA).

La termogravimetría es una técnica de análisis térmico que permite la medición continua de la variación de masa de un material en función de la temperatura. Como resultado se obtiene un termograma, curva termogravimétrica o perfil termogravimétrico, que es un esquema donde se representa la variación de la masa (generalmente en porcentaje de pérdida de masa) en función de la temperatura o el tiempo (**Figura 7**). Estas variaciones en la masa de una

muestra aportan información acerca de su composición y estabilidad térmica, así como la de sus intermediarios y productos obtenidos al finalizar la degradación térmica (Sierra et al., 2010).

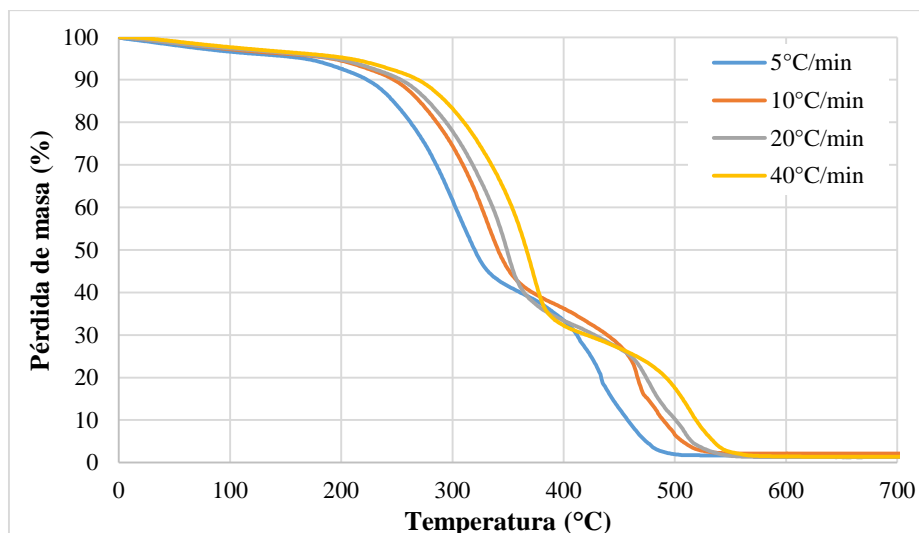
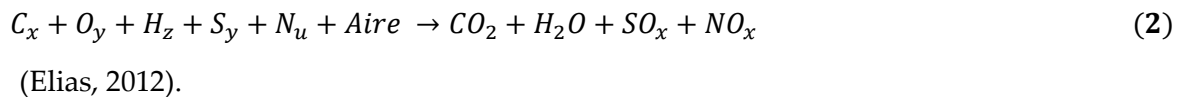


Figura 7. Perfil termogravimétrico obtenido a partir de las muestras analizadas de semillas de chirimoya bajo fertilización mineral (Capítulo 7).

Combustión.

De forma general, se entiende por combustión toda reacción química que va acompañada de gran desprendimiento de calor. Centrando la atención al tema que atañe a esta tesis, la combustión es el conjunto de reacciones químicas que suceden a una velocidad relativamente alta en las que a partir de una temperatura determinada se combina oxígeno (comburente) con los componentes susceptible de oxidación de la biomasa (combustible), liberándose en el proceso gran cantidad de energía en forma de calor y luz (con llama o sin ella).

Es el método de transformación termoquímico de energía conocido más antiguo y ha sido ampliamente utilizado a lo largo de la historia. La ecuación general del proceso se puede entender como la ecuación de la fotosíntesis a la inversa: partiendo de materia orgánica se obtienen como productos principales dióxido de carbono y agua. Se representa con la siguiente expresión general:



La biomasa posee la misma ruta de combustión que el carbón, por lo que se distinguen tres etapas en el proceso global (Barrera et al., 2018). En este punto, el lector no debe de entender la consecución de estas etapas como una serie definida dado que en multitud de ocasiones se produce la superposición de unas etapas con otras. El tiempo que dura cada una de ellas depende del tipo del combustible, sus propiedades, y las condiciones de combustión (tipo de comburente, estequiometría, temperatura y tipo de cámara de combustión) (Lassi, 2013).

1. *Precaentado y secado.*

A temperaturas inferiores de 150 °C se produce una etapa previa de secado por evaporación de la humedad contenida en la muestra.

Es necesario secar el material para reducir su contenido en humedad, asegurando la autocombustión y haciendo más eficiente el sistema.

2. *Desvolatilización.*

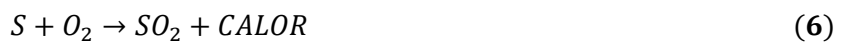
La biomasa al tratarse de un combustible sólido debe de pasar por una fase previa de desvolatilización con el fin de liberar los volátiles, ya que las reacciones posteriores de combustión suceden siempre en fase gaseosa.

Por tanto, a medida que la temperatura va aumentando tienen lugar reacciones de deshidratación, hidrólisis y oxidación (inyección de aire primario) de los principales constituyentes de la biomasa (celulosa, hemicelulosa y lignina).

En esta etapa se forman sustancias alquitranosas y se desprenden compuestos orgánicos volátiles que pueden ser combustibles (como el ácido acético y el metano) o inertes (como el dióxido de carbono). A esta liberación de gran variedad de gases, que pueden llegar a suponer entre un 70% y un 80% del peso total del combustible, se le denomina volatilización. A su fin, se obtiene además un sólido carbonado formado principalmente por carbono y minerales no combustibles.

3. *Combustión de las sustancias alquitranosas y los volátiles.*

Cuando la temperatura sobrepasa los 800 °C – 1000 °C comienza la combustión propiamente dicha. Utilizando aire como fuente de oxígeno (inyección de aire secundario), las principales reacciones exotérmicas que se producen son las oxidaciones del carbono, el hidrógeno y el azufre:



Además, debido al contenido en nitrógeno del aire introducido, así como de su concentración en la biomasa, se producen reacciones de oxidación de este elemento. A temperatura ambiente el oxígeno y el nitrógeno no reaccionan entre sí debido a que se trata de una reacción química altamente endotérmica. Sin embargo, las altas temperaturas alcanzadas durante la combustión facilitan la energía, en forma de calor, necesaria para el desarrollo de la reacción (**Ecuación 8**). El NO es la especie primaria (>90%) que se forma durante la combustión, y luego puede oxidarse en la atmósfera a NO₂ (**Ecuación 9**), principal responsable de la contaminación atmosférica (Jenkins et al., 2019).



También durante esta etapa se produce la oxidación del sólido carbonado formado en la etapa anterior liberando calor y quedando reducido a cenizas.

Al finalizar todas las reacciones se obtienen dos tipos de productos: los gaseosos, denominados humos o gases de combustión, y los sólidos, cenizas formadas por componentes no combustibles y por aquellos que a pesar de sí tener capacidad combustible no han sido totalmente combustionados en el proceso. Las cenizas están compuestas principalmente por

SiO₂ y CaO, y en menor medida por Mg, Al, P y K (Barrera et al., 2018), y de forma general su contenido es menor en biomasa forestal que herbácea (Ardila et al., 2021). Se recomiendan bajos niveles de cenizas y sistemas que permitan su correcta evacuación ya que su acumulación propicia la aparición de fenómenos de escorificación y erosión, afectando directamente a la eficiencia y buen funcionamiento de las calderas.

Dependiendo de la composición del combustible, la cantidad de oxígeno necesaria para completar su combustión es variable. Esta cantidad exacta es el oxígeno estequiométrico. Comúnmente se utiliza aire como comburente por ser la fuente de oxígeno más abundante, barata y fácil de manejar, aunque también pueden usarse directamente oxígeno. El exceso de aire es la diferencia entre el aire introducido realmente a la cámara de combustión y el aire teórico estequiométrico. Esta diferencia debe de estar lo más ajustada posible porque la sobre estimación de aire supone una disminución en la temperatura de los gases y, por tanto, una pérdida de energía. Por el contrario, un déficit de aire supone la oxidación incompleta del combustible, de forma que solo se obtiene una parte de la energía contenida en él. Esto conlleva la aparición de los inquemados como el monóxido de carbono, hidrocarburos y partículas de carbono (las cenizas anteriormente mencionadas), que ponen en riesgo la eficiencia del sistema por sus aptitudes contaminantes.

La oxidación de la biomasa es un proceso altamente exotérmico que permite la autoalimentación para proseguir la reacción sin apoyo externo de energía. Sin embargo, normalmente la combustión no es espontánea y es necesario tener un foco de ignición o foco de calor a elevada temperatura que lleve el combustible a su temperatura de inflamación. La elevación de la temperatura aumenta la velocidad de reacción, que depende del choque entre las moléculas de los cuerpos reaccionantes, ya que consigue alcanzar los estados de complejo activo de las reacciones rápidamente. Además, hay que tener en cuenta que para conseguir una temperatura homogénea la distribución del aire añadido es vital. Para ello, lo más común es inyectarlo en diferentes zonas: el aire primario próximo al combustible para facilitar su secado y volatilización; y el aire secundario en la zona de combustión de los volátiles (Nogués et al., 2010).

Otro parámetro que determina la velocidad del proceso de combustión es el tamaño de partícula de la biomasa. Al disminuir el tamaño de las partículas del material, la superficie de

contacto con el oxígeno aumenta y, por tanto, se incrementa la liberación de gases combustibles en la cámara de combustión. Además, bajo estas condiciones se acelera la evaporación del agua presente en el interior de la biomasa.

Aunque ya se ha explicado cómo el oxígeno, la humedad, el contenido en cenizas, la temperatura y la granulometría determinan la eficiencia de la combustión, la calidad como combustible de una determinada biomasa viene dada por su poder calorífico. Se entiende por poder calorífico a la cantidad de energía que se puede obtener de cada unidad de masa de biomasa cuando es sometida a una combustión completa. Inversamente relacionado con la humedad del sistema, cabe diferenciar entre:

- *Poder calorífico superior (PCS o HHV por sus siglas en inglés, higher heating value) o bruto:* cantidad de energía que se puede obtener por cada kilogramo de biomasa sin tener en cuenta la energía robada en la generación de vapor de agua, bien de formación o bien de constitución. Por tanto, el agua de los productos se presenta en estado líquido.
- *Poder calorífico inferior (PCI o LHV por sus siglas en inglés, lower heating value) o neto:* cantidad total de energía que puede liberarse de cada kilogramo de biomasa teniendo en cuenta la energía empleada en la generación del vapor de agua. Así, el agua de los productos se presenta en forma gaseosa y es liberada junto con los gases de combustión.

El poder calorífico superior (HHV) excede al inferior (LHV) en la energía necesaria para evaporar el agua formada. Por el hecho de que de forma prácticamente general el agua contenida en los productos está en forma de vapor, se usa generalmente el poder calorífico inferior. No obstante, ambos son igualmente válidos, y por ello al proporcionar un dato de poder calorífico es imprescindible especificar a cuál de ellos hace referencia.

La combustión es la forma de valorización energética de la biomasa más difundida ya que a partir de ella se consigue la generación directa de calor (bien sea para calefacción, secado, procesos industriales, etc.) o la generación eléctrica a partir del calentamiento de un fluido en una caldera y expandiendo el vapor generado en turbinas de vapor (ciclo Rankine).

Pirólisis.

Descomposición térmica de materia orgánica, mediante la aportación de calor, bajo una atmósfera inerte. Al final del proceso se obtienen tres fracciones: un residuo sólido carbonoso, una fase líquida y una proporción de productos gaseosos. En función del tipo de material inicial utilizado y las condiciones mantenidas, la composición de las diferentes fases es variable.

La aportación de calor al proceso puede darse de dos formas diferentes, diferenciándose así dos tipos de sistemas: alotérmicos y autotérmicos.

- Sistemas alotérmicos: la transmisión del calor se realiza indirectamente por conducción o radiación de las paredes de la cámara. Generalmente la energía procede de la combustión de parte de los gases producidos durante la pirólisis.
- Sistemas autotérmicos, o de calentamiento directo ya que la energía es suministrada por combustión parcial del material a pirolizar (para lo que se deja entrar una mínima cantidad de oxígeno a la cámara).

Durante la pirólisis se van sucediendo multitud de reacciones en secuencias de diferentes tipos, tanto de los componentes iniciales (reacciones primarias) como entre los propios productos que se van obteniendo (reacciones secundarias). Todo ello resulta en una complejidad de operación superior a cualquiera de los otros dos métodos de aprovechamiento térmico descritos más abajo.

Las principales variables del proceso de pirólisis son el tipo de biomasa inicial, la temperatura máxima, las condiciones de la atmósfera de reacción, la tasa de calentamiento, la presión y el tiempo de permanencia de los productos en el reactor. A partir del control y ajuste de estos parámetros es posible influir en la distribución y características de sus principales productos (Gómez et al., 2008). Grosso modo, la composición de cada una de las fases obtenidas puede resumirse en (Elias, 2005):

- Componente sólido: también llamado char, biochar o coque. Consiste en carbono casi puro mezclado con el material inerte que entra en el proceso (nutrientes agrícolas, metales pesados y cenizas).

- Componente líquido: también conocido como bioaceite o bio-oil. Se trata de un conjunto heterogéneo de vapores condensables, líquidos a temperatura ambiente, consistente en alquitranes y/o bien aceite que contiene agentes químicos tales como ácido acético, acetona y metanol.
- Componente gaseoso: compuesto básicamente por hidrógeno, metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono y otros gases.

Si se centra la atención en el concepto de “**mecanismo de reacción**”, este describe de manera detallada cómo se presentan las reacciones químicas de un proceso, explicando cómo se van produciendo las variaciones en las propiedades químicas de los componentes (Gómez et al., 2008). Sin embargo, y a pesar de la gran labor de investigación experimental, debido a la complejidad de las reacciones químicas que transcurren durante la pirólisis, no hay consenso sobre los mecanismos de reacción de este proceso. Por esta razón, la información que sigue destacará solo algunas observaciones generales (Douvartzides et al., 2022):

- La descomposición comienza alrededor de los 100°C – 180°C con la evaporación de la humedad y otros productos volátiles.
- Entre los 200°C y los 250°C los componentes menos estables se descomponen en lo que se conoce como “degradación primaria”. Se liberan gases como monóxido y dióxido de carbono e hidrocarburos líquidos como metanol.
- En torno a 275°C se eleva la temperatura de la masa al reaccionar exotérmicamente, liberando gran cantidad de hidrocarburos líquidos.
- Por encima de los 300°C se conoce como “descomposición secundaria”. Se producen volátiles y destaca la formación de alquitranes. El sólido producido durante la descomposición primaria sufre una aromatización lenta en esta fase.
- La degradación térmica de la biomasa finaliza entre los 500°C y los 600°C aproximadamente.

Gracias a la investigación desarrollada en este ámbito ha sido posible establecer que la hemicelulosa es el componente más inestable térmicamente, siendo por tanto el primero en reaccionar. Seguidamente lo hace la celulosa y por último, a mayores temperaturas, la lignina.

Desde un punto de vista operativo, los procesos de pirólisis pueden encuadrarse en tres grandes bloques: pirólisis convencional, pirólisis rápida (fast pyrolysis) y pirólisis instantánea

(flash pyrolysis). Siguiendo esta filosofía la **Tabla 3** reproduce las principales características de los diversos tipos de pirólisis (Elias, 2005; Rincón-Martínez and Silva-Lora, 2015).

Tabla 3. Tipos de pirólisis: características y diferencias entre ellas.

	Temperatura (°C)	Velocidad de calentamiento (°C/s)	Tiempo residencia	Producto mayoritario
CONVENCIONAL	500	Lenta (0,1 – 1)	Gases 5 s Sólidos horas	Sólidos y líquidos (gases baja proporción)
RÁPIDA (Fast)	400 – 800	Elevada (10 – 200)	Gases <2 s	Bioaceites
INSTANTÁNEA (Flash)	800 - 1000	Muy elevada (> 200)	Gases <0,5 s	10% sólido 60% gases (H ₂ , CO)

Hay múltiples parámetros que afectan a la composición y proporción de los productos finales obtenidos de una pirólisis. Así, los efectos de la composición química de la biomasa son decisivos en las reacciones. Los tipos de biomasa conformados por fracciones mayores de lignina están asociados a mayores rendimientos de la fracción de carbonizado durante el proceso. Del mismo modo, concentraciones altas de cenizas permiten la síntesis de material carbonizado a menores temperaturas de reacción.

La relación temperatura-tiempo a la que se somete la biomasa afecta a la rapidez y duración de las reacciones químicas y, por ende, a la distribución y composición de los productos obtenidos. La generación de gradientes de temperatura conlleva que la biomasa no reaccione de manera homogénea. También se presentan diferencias en la secuencia de las reacciones. Las tasas de calentamiento bajas y moderadas, sin la evacuación rápida de la fase volátil de la zona de reacción, permiten durante tiempo prolongado el contacto de esta fase con el residuo sólido. De esta manera se propicia el desarrollo de reacciones secundarias en la fase volátil y el incremento de la fracción sólida (Antal and Várhegyi, 1995). Contrariamente, las tasas de calentamiento elevadas, con evacuación rápida de la fase volátil, evitan el contacto prolongado entre esta fase y el residuo sólido, eliminando las reacciones secundarias. De esta forma se disminuye la fracción final del carbonizado (Gómez et al., 2008).

A estas dificultades se suman los efectos debidos a los extractos (del inglés *extractives*), que, junto con las cenizas indicadas anteriormente, actúan como catalizadores de las reacciones influyendo sobre su velocidad y resultado final.

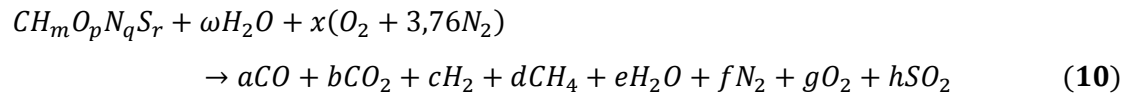
Dentro de las características físicas de la biomasa, el tamaño de grano tiene también una influencia importante. Cuanto mayor sea el tamaño de grano, mayor es el tiempo necesario para que los productos primarios se liberen de la partícula. Este factor estimula la aparición de reacciones secundarias entre las fases volátil y sólida.

El destino de los productos finales obtenidos también es variable. El material sólido o carbonizado se puede utilizar como combustible para procesos industriales, en la producción de calor o como materia prima para la producción de carbón activado. El gas producido se utiliza para la generación de energía mecánica y térmica o puede ser sintetizado para la producción de otros productos químicos. Sin embargo, actualmente uno de los principales objetivos de la pirólisis es la conversión del producto líquido en un combustible rico en hidrocarburos para su combustión en motores y en la generación de energía mecánica y térmica (Gómez et al., 2008). Tal y como se obtiene la fracción líquida de la pirólisis de biomasa recibe el nombre de aceite de pirólisis o bioaceite. Se trata de un aceite viscoso de color marrón oscuro rico en compuestos orgánicos insolubles (principalmente aromáticos y alifáticos) de alto peso molecular y una proporción variable de agua (Biswas et al., 2017). El bioaceite con un contenido de agua apropiado puede usarse directamente como biofuel para calderas, aunque también puede ser mejorado y refinado para conseguir biodiesel para motores, así como para obtener otros productos bioquímicos de valor agregado (Sakulkit et al., 2020).

Gasificación.

La gasificación es la oxidación parcial de materia carbonada en condiciones subestequiométricas de oxígeno, o en presencia de otro agente gasificante, y altas temperaturas obteniéndose principalmente una mezcla de gases con propiedades combustibles denominada *syngas* o gas de síntesis. Al igual que en el resto de los procesos de transformación energética tratados, la composición y proporción de este gas de síntesis depende en gran medida de la biomasa inicial utilizada y de las condiciones de operación aplicadas.

Describir un esquema general de las reacciones involucradas en la gasificación de biomasa es muy complejo debido a la variabilidad de solutos y condiciones de operación existentes (Estrada y Meneses, 2004). La ecuación global de reacción que describe el proceso es:



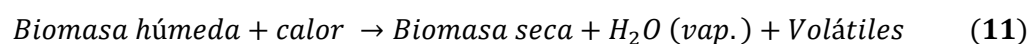
De forma común, la multitud de reacciones que tienen lugar durante la gasificación de biomasa se pueden englobar en cuatro etapas: secado, pirólisis, combustión parcial y gasificación (Basu, 2018). De nuevo, debe de tenerse en cuenta que aunque estos pasos serán explicados en serie, realmente no existe un límite perfectamente definido entre ellos y muy frecuentemente se superponen en el tiempo.

1. *Precaentado y secado.*

En esta primera etapa se produce el calentamiento y secado de la biomasa con el objetivo de reducir su humedad.

El contenido de humedad de madera recién cortada varía en la mayoría de los casos entre un 30% y un 60% y se estima que se necesitan en torno a 2260 kJ de energía para conseguir vaporizar cada kilogramo extra de agua, un consumo excesivo que no se recupera. Es por esto que se necesita de una primera etapa de secado de la materia previamente a que sea introducida en el gasificador.

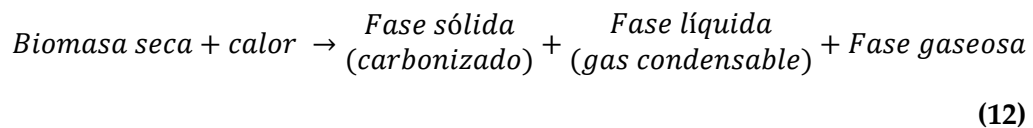
Para la obtención de un gas de síntesis con un poder calorífico aceptable se requiere una humedad en la materia en torno al 15% - 20%. Este secado final tendrá lugar ya en el gasificador, donde el calor libera irreversiblemente el agua remanente de la biomasa a temperaturas por encima de los 100 °C. A medida que la temperatura va elevándose, comienza además la liberación de los volátiles de menor peso molecular, finalizando esta etapa en torno a los 200 °C.



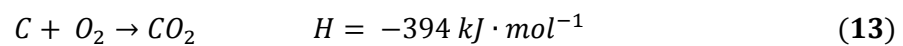
2. *Pirólisis o degradación térmica.*

El objetivo de esta fase es simplificar moléculas más complejas en otras más sencillas. Dependiendo de las condiciones mantenidas en este punto, los productos obtenidos, sustratos de las siguientes fases, son variables. Así, por ejemplo, si la pirólisis se desarrolla convencionalmente (a baja temperatura), se obtendrá mayor proporción de carbonizado; y si por el contrario se realiza a altas temperaturas (*fast* o *flash* pyrolysis) se conseguirá una mayor fase gaseosa.

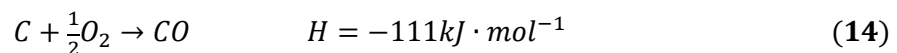
De una u otra forma, un producto muy importante a tener en cuenta es el alquitrán formado por la condensación de los gases condensables en el proceso. A día de hoy la gestión de esta fracción continúa suponiendo uno de los puntos críticos de la gasificación como proceso global, ya que afecta negativamente a algunas partes del sistema mecánico del gasificador. Esta etapa comprende el rango de temperatura desde los 150 °C hasta los 700 °C.

3. *Combustión parcial de ciertos gases, vapores y carbón.*

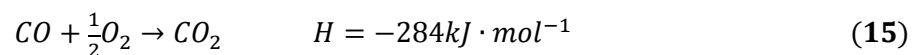
La mayoría de las reacciones de la gasificación (punto 4) son endotérmicas. Para proveer la energía necesaria para estas reacciones, así como para el precalentamiento, secado y pirólisis, se permite una pequeña combustión exotérmica en el interior del gasificador. Las principales reacciones que aportan la energía al sistema son:



(Klass, 1998)



(Higman and van der Burgt, 2008)

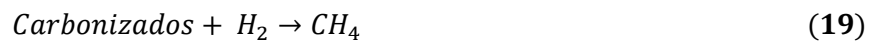
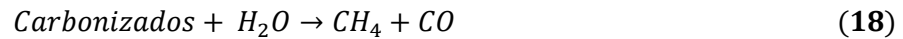
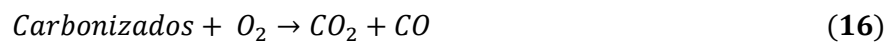


(Knoef, 2005)

4. *Gasificación de los productos de descomposición.*

Consiste en un conjunto de reacciones químicas de reducción en el reactor entre los hidrocarburos del combustible y el agente gasificante (aire, vapor de agua, CO₂, O₂, y/o H₂), así como entre los gases que se van generando. Estas reacciones, por tanto, pueden ser heterogéneas (sólido-gas) u homogéneas (gas-gas). La temperatura alcanzada en esta etapa oscila entre los 600 °C y los 1500 °C.

De todas las reacciones que ocurren, la gasificación del carbonizado es la más importante. El carbonizado es la fase sólida que se obtiene de la pirólisis, formado por carbono en su mayoría, aunque también por una pequeña proporción de hidrocarburos que enlazan hidrógeno y oxígeno. La reactividad del carbonizado, al contrario que el carbón fósil, aumenta conforme discurre la conversión y son varias las reacciones involucradas en su gasificación. Dependiendo del agente gasificante podemos encontrar:



Algunas de estas reacciones se conocen comúnmente con otros nombres, como las correspondientes a las **Ecuaciones (16) y (18)** que se denominan respectivamente reacción de Boudouard y reacción de hidrogasificación.

Aunque en su mayoría se trata de reacciones endotérmicas, algunas de las reacciones de gasificación son exotérmicas, como aquellas en las que el carbono reacciona con oxígeno e hidrógeno.

Al final de esta fase el carbonizado sólido inicial queda transformado en una mezcla de gases de bajo peso molecular.

Los agentes gasificantes más utilizados son el aire y, en menor medida, el vapor de agua. El uso de oxígeno puro (O₂), hidrógeno (H₂), dióxido de carbono (CO₂) o incluso la mezcla de varios de ellos, se limita para la obtención de productos especiales. El agente de gasificación utilizado actúa favoreciendo o limitando la secuencia de reacciones, siendo determinante de

las características del proceso y las propiedades finales del gas de síntesis. En la gasificación con aire se obtiene un gas de síntesis con menor poder calorífico (4-6 MJ/m³N) debido a la presencia de altas concentraciones de N₂ introducidas junto al aire (Rincon et al., 2019). El uso de oxígeno (O₂) en la gasificación elimina este N₂ de la mezcla final y en su lugar se obtienen mayores contenidos de CO y H₂, alcanzando hasta el triple de poder calorífico (10-20 MJ/m³N) (Nipattummakul et al., 2010). El uso de hidrógeno (H₂) como agente gasificante implica la obtención de un gas de síntesis con una importante e interesante proporción de CH₄ y un alto poder calorífico (>30 MJ/m³N) (Pérez et al., 2006). En función de la aplicación que se quiera dar al gas de síntesis obtenido se elegirá uno u otro agente de gasificación. Otro tipo de condicionantes en esta elección pueden ser motivos económicos dado que el uso de O₂, H₂ y CO₂ implica un gasto extra porque requieren de procesos anteriores de síntesis.

Los productos finales de la transformación térmica por gasificación son una parte sólida constituida por las cenizas, una fracción de naturaleza similar al alquitrán, procedente de gases condensables y un gas combustible. Este último constituye el producto fundamental del proceso y está compuesto por una mezcla variable de CO, H₂, CO₂, CH₄, N₂, H₂O e hidrocarburos ligeros. Por regla general, los gases de gasificación tienen una proporción de hidrocarburos muy inferior a los que proceden de pirólisis (Elias, 2005).

Sin embargo, debe de tenerse en cuenta que la composición y propiedades energéticas de la mezcla de gases de síntesis no solo depende del agente oxidante utilizado, sino también de otros parámetros como las características de la propia biomasa, la temperatura, presión y el modelo del reactor (Estrada y Meneses, 2004). Estas variables a su vez influyen también en la presencia y contenido de diferentes tipos de contaminantes en el *syngas* como materia particulada, amoníaco (NH₃), cianuro de hidrógeno (HCN) y ácido sulfhídrico (H₂S) (Rincón et al., 2019).

La gasificación es uno de los procesos de transformación de energía que aporta mayor valor añadido a la biomasa ya que permite la obtención de un gas con multitud de usos potenciales: generación de calor en una caldera o en un motor, generación de calor y electricidad en una turbina de gas y en una turbina de vapor (ciclo combinado), generación eléctrica en una pila de combustible y síntesis química de metanol, gas natural sintético, hidrógeno, combustibles sintéticos vía Fischer Tropsch, etc. (Ciferno and Marano, 2002).

No obstante, de acuerdo a todo lo anterior, previo a la utilización de este *syngas* es de vital importancia la depuración y acondicionamiento del mismo con el objetivo de: eliminar contaminantes o reducirlos a niveles suficientemente bajos para cumplir con la normativa medio ambiental; ajustar la relación CO/H₂ mejorando la calidad del gas previo a su aprovechamiento energético o a su conversión en combustibles limpios (H₂ o síntesis química); y facilitar la reducción progresiva de emisiones responsables de la acidificación (NH₃) y del efecto invernadero (CO₂, CH₄) (Ruiz and Sánchez, 2014).

Beneficios Y Limitaciones Del Uso De Biomasa Como Fuente De Energía.

El análisis de la literatura muestra que el uso con fines energéticos de la biomasa de procedencia agrícola y forestal lleva consigo múltiples beneficios en los ámbitos social, económico y ambiental.

En referencia a la discusión sobre la crisis energética (Hosseini, 2022) la biomasa es una de las fuentes de energía más confiables debido a su producción, disponibilidad y almacenaje, lo que ensalza este método de generación de energía térmica y eléctrica. Esta energía respeta y protege el medio ambiente, promueve la creación de nuevos puestos de trabajo, constituye una oportunidad para las comunidades energéticamente vulnerables, minimiza la emisión de gases de efecto invernadero, recalifica los residuos en recursos, suscita inversiones y conlleva el establecimiento de nuevos negocios y empresas relacionadas (Gokcol et al., 2009; Janiszewska and Ossowska, 2018).

El crecimiento de la población y su constante demanda de alimentos y otros recursos básicos ha supuesto una intensificación de las actividades agrícolas e industriales, cuyos residuos constituyen un problema creciente (Tripathi et al., 2019). En este contexto, la biomasa se está desarrollando como un recurso cada vez más importante en la producción de energía renovable, que garantiza el aprovechamiento de los desechos y residuos al mismo tiempo que defiende la descentralización de la producción de energía y la protección del medio ambiente (Haase et al, 2016).

La biomasa constituye una de las materias primas más populares y universales del planeta (Tenchea et al., 2019; Janiszewska and Ossowska, 2020). La Unión Europea cuenta con un

potencial muy significativo en lo referente a la producción y uso de los residuos agrícolas, forestales e industriales en términos de producción energética (Scarlat et al., 2010; Hamelin et al., 2019) hasta el punto que la biomasa se ha convertido en la primera fuente de energía renovable en este territorio, representando el 60% del total de energía producida alternativamente a los combustibles fósiles (Janiszweska and Ossowska, 2022) La biomasa usada es principalmente de procedencia agrícola (tanto cultivos agrícolas directos como subproductos), seguida de los residuos municipales e industriales (European Commission, 2017).

Sin embargo, a la hora de considerar la biomasa como un factor clave en la producción de energía sostenible, se deben de tener en cuenta determinadas limitaciones de este tipo de recurso, principalmente en los ámbitos sociocultural, económico, tecnológico, logístico y legal. La biomasa procede de multitud de sectores económicos diferentes, por tanto, regulados por diversas políticas (Muscat et al., 2021). Las diferentes condiciones geográficas y climáticas, así como el nivel de desarrollo de las actividades agrícolas, suscitan grandes diferencias espaciales y temporales en cuanto a la generación de los residuos biomásicos disponibles para la producción de bioenergía, poniendo en peligro la seguridad y continuidad del suministro (Janiszweska and Ossowska, 2022). Así, a pesar de su papel significativo, el potencial de la biomasa se puede llegar a percibir como un valor dinámico y variable en el tiempo, influenciado por diferentes cambios y características tales como la cantidad de tierra disponible, la estructura de los cultivos, la asignación de cultivos energéticos y el cambio climático (Daioglou et al., 2019; Knápek et al., 2020). Así mismo, su futuro puede verse comprometido por factores impredecibles como el desarrollo económico, la dinámica de población, la demanda de alimentos, las decisiones sobre la protección de la tierra o los cambios en la intensidad de la producción agrícola y forestal (Nakicenovic et al., 2000).

La biomasa solo puede seguir desempeñando un importante papel como fuente de energía renovable si se produce y utiliza de manera eficiente y sostenible, de acuerdo al principio de cascada y los objetivos de biodiversidad y secuestro de carbono de la Unión Europea. Siguiendo el principio de cascada, la biomasa debe de reutilizarse, reciclarse, usarse para la obtención de bioenergía y, en última instancia, eliminarse. De este modo, evitando vulnerar lo descrito anteriormente, la Estrategia de Biodiversidad de la Unión europea para 2030

defiende la limitación del uso de árboles enteros para la producción de energía (Janiszweska and Ossowska, 2022). Además, desde un punto de vista ético, solo la biomasa que no compita con la producción de alimentos debe utilizarse con fines energéticos (Gravilescu, 2008). Así, los desechos, residuos y excedentes de biomasa procedente de la actividad agrícola cumplen con estos criterios (Alatzas et al., 2019).

Un condicionante final a tener en cuenta es la maximización de la eficiencia de la conversión, minimizando las emisiones contaminantes. Cualquier forma de producción de energía, incluidas las renovables, dependen de acciones indispensables e inherentes a la extracción, movimiento y procesado de los materiales (Mills, 2019). La fabricación de los equipos y dispositivos necesarios para estas actividades requiere de productos básicos que hasta ahora provienen de la minería y cuyas técnicas de obtención están estrechamente relacionadas con el consumo intensivo de minerales fósiles (Jimeno and González, 2022). Además, el propio aprovechamiento de los recursos biomásicos a un alto rendimiento puede ocasionar efectos de deposición de cenizas y escorificación, dependiendo del material biomásico utilizado. Todo ello conlleva la disminución de la eficiencia del proceso de obtención de energía, el aumento de las emisiones y la aparición de problemas operativos. El uso de tecnologías probadas y con mantenimientos adecuados favorece que el aprovechamiento contribuya positivamente al medio ambiente, a pesar de que en algunas ocasiones la viabilidad económica de dicho aprovechamiento pueda verse comprometida (Nogués et al., 2010).

En síntesis, aunque existen algunos desafíos que deben superarse, el uso de biomasa como materia prima principal para la producción de energía renovable no solo es beneficioso en un contexto económico, sino también ambiental y social, especialmente en las zonas rurales (Odavic et al., 2017). De ahí la importancia de potenciar el desarrollo de este sector aún infrautilizado (Vaish et al., 2022), teniendo en cuenta el uso de todos los recursos disponibles de manera sostenible y sin impactos negativos (Scarlat et al., 2010).

Marco Legal De Las Energías Renovables.

A nivel mundial ha habido un crecimiento significativo de las políticas para apoyar la transición hacia fuentes de energía renovables. En el seno de estas políticas se fomentan desde planes estratégicos hasta instrumentos regulatorios, pasando por incentivos financieros. Según la base de datos de políticas de la Agencia Internacional de Energía, 126 países tienen políticas activas de energía renovable (Levenda et al., 2021).

El empleo de renovables ha sido desde hace décadas un aspecto importante para el funcionamiento de la Unión Europea. Uno de los primeros documentos sobre energía en esta comunidad fue la Resolución del Consejo sobre los objetivos comunitarios en materia energética de 1986, donde ya se promovían las energías renovables. Unos pocos años más tarde, en 1997, se firmó el Protocolo de Kyoto por un total de 55 países en la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, aunque no fue hasta 2013 cuando entró en vigor. En este contexto, la Unión Europea, junto con otros estados miembros, comenzó a desarrollar la investigación de energías sostenibles impulsando un amplio apoyo político y económico. Aunque sin duda fue la directiva 2009/28/CE la que afianzó el compromiso de la Comunidad de invertir en la producción de estas energías alternativas.

La directiva 2009/28/CE fijó los objetivos para 2020, donde se acordó reducir un 20% el consumo de energía y la emisión de gases de efecto invernadero con respecto a 1990. Para lograr su consecución fijaron que el 20% del consumo de energía debía de ser proporcionado por fuentes renovables. Posteriormente, esta directiva fue modificada (CE/2014) para incluir los nuevos objetivos sostenibles para 2030. En esta nueva directiva el porcentaje de consumo de energía procedente de fuentes renovables debe de ser al menos del 27% y la reducción de gases de efecto invernadero del 40% respecto a valores de 1990.

Entretanto, en 2015 se firmó en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático el Acuerdo de París, un tratado internacional jurídicamente vinculante adoptado por 193 países más la Unión Europea. Este tratado incluye compromisos para reducir sustancialmente las emisiones de gases de efecto invernadero y limitar así el aumento de la temperatura global del planeta.

En definitiva, la Unión Europea está invirtiendo esfuerzos políticos y económicos para lograr con el desarrollo de las energías renovables dejar de ser dependiente energéticamente del exterior a la vez que se asegura la protección del medio ambiente.

Cultivos Energéticos Tradicionales.

Una gran diversidad de países ha estado y están involucrados en la búsqueda de nuevas fuentes y sistemas que permitan obtener la cantidad de energía necesaria para el mantenimiento y desarrollo de las sociedades a la par que se abordan sus principales problemas globales: el agotamiento de los recursos fósiles y el cambio climático (Cho and Kim, 2019). Ya en la década de los 70, tras la crisis energética del petróleo, se comenzó a sopesar la posibilidad de obtener energía a partir del sector agrícola mediante cierto tipo de cultivos: los cultivos energéticos.

Se entiende por **cultivo energético** aquel cuya cosecha se destina a la producción de energía. Por tanto, en este caso no se buscan unos estándares de forma, color o sabor de la cosecha, sino obtener la máxima cantidad de energía por unidad de superficie, al menor coste y minimizando el posible impacto ambiental que pudiera ocasionarse en el transcurso de la actividad (Nogués et al., 2010).

La biomasa de cultivos energéticos es un recurso muy versátil, pudiéndose obtener a partir de ella múltiples formas de energía como calor, electricidad o biocombustibles. Tal es así que se espera que la demanda futura alcance un crecimiento importante (Nogués et al., 2010; Chao et al., 2019). Son múltiples los estudios que sostienen que, previsiblemente, las plantaciones bioenergéticas constituirán la principal fuente de biomasa con fines energéticos a nivel mundial (por poner algún ejemplo de la extensa bibliografía existente: Chao et al., 2019; Pires et al., 2019; Launardie et al., 2022; Viccaro et al., 2022; Næss et al., 2023).

Para satisfacer la demanda mundial de biocombustibles, la Agencia Internacional de Energía (Agencia Internacional de la Energía, 2011) ha pronosticado que se necesitarán 65 millones de hectáreas de tierra cultivable para 2030 y 105 millones de hectáreas para 2050; y se espera que los cultivos energéticos lignocelulósicos cubran entre el 5% y el 10% del área forestal mundial para 2050 (Fernández et al., 2020).

Entre las características ideales que debe cumplir un cultivo para considerarlo potencialmente apto para ser dedicado a fines energéticos cabe citar los siguientes puntos (Cumplido-Marin, 2020):

- Tener altos niveles de productividad en biomasa con bajos costes de producción, de tal forma que hagan económicamente viable el coste de la unidad energética en relación con los combustibles fósiles.
- Posibilidad de desarrollarse en tierras marginales, no utilizadas para la producción de alimentos.
- La biomasa producida debe de ser adecuada para su utilización como biocombustible sólido o como biocarburante.
- Tener un balance energético positivo, es decir, que la energía neta contenida en la biomasa producida sea superior a la consumida en el cultivo.
- No contribuir a la degradación del medio ambiente, de tal forma que el balance medioambiental producido por su cultivo sea superior al que se produciría si la tierra no estuviese cultivada o fuera sembrada por un cultivo tradicional.
- Posibilidad de utilizar maquinaria agrícola convencional de uso normal por los agricultores en las explotaciones tradicionales de la zona.

Además, otras características importantes para definir el cultivo energético ideal son aquellas que tienen que ver con las especies vegetales implicadas. Se buscan especies de crecimiento rápido, con capacidad de adaptación a condiciones severas (Dubois, 2011), alta eficiencia en el uso del agua, capacidad de rebrote (Nogués et al., 2010), y capacidad de almacenar energía por unidad de peso sin acumular contaminantes (Rahman et al., 2014).

Por tanto, a pesar de que aparentemente el número de especies potencialmente consideradas aptas para este tipo de cultivos es cuantiosísimo, hay que tener en cuenta que solo aquellas que puedan adaptarse con buenos rendimientos a las condiciones edafoclimáticas de la zona podrán ser utilizadas para tal fin (Fernández-González et al., 2015)

Entre los sistemas de cultivo forestal, las plantaciones de rotación corta (*short rotation forestry*, SRP) son de gran interés ya que utilizan tiempos de retorno cortos durante los que se cultivan especies arbóreas de crecimiento rápido bajo prácticas agrícolas intensivas (control de maleza, aplicación de fertilizantes, riego, etc.) para lograr altos rendimiento de biomasa (Pleguezuelo

et al., 2015). Es por este motivo por el que especies como el chopo (*Populus* sp.) y el sauce (*Salix* sp.), que se han utilizado tradicionalmente para la producción de madera y pulpa, se utilizan desde hace algunos años para la generación de energía. Otras especies forestales comúnmente cultivadas con fines energéticos, entre otras, son el eucalipto (*Eucalyptus* sp.), la paulownia (*Paulownia*, sp.), la robinia (*Robinia*, Sp.), el pino (*Pinus* sp.), la acacia (*Acacia* sp.), el aliso (*Alnus* sp.), el abedul (*Betula*, sp.), el arce (*Acer* sp.), el nogal (*Juglans* sp.) o la morera (*Morus* sp.). Básicamente se trata de cultivos con períodos de rotación inferiores a 15 años y una producción leñosa rentable, en la que los árboles se cortan en cada periodo de rotación y se dejan crecer de nuevo (Pleguezuelo et al., 2015; Fernandez et al., 2020).

También pueden establecerse cultivos energéticos con especies herbáceas, como por ejemplo el sorgo (*Sorghum bicolor*, L.), el trigo (*Triticum* spp.), el pasto varilla (*Panicum virgatum*, L.), el miscanthus (*Miscanthus* spp.) o la caña de azúcar (*Saccharum* spp.), entre otros (Lee et al., 2018).

El interés en las energías renovables a partir de biomasa tiene un enorme potencial de crecimiento. Además de su diversidad, altos rendimientos, bajo coste y reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Fernando et al., 2018; Mitchel et al., 2016), destacan por su capacidad para desarrollar la economía del medio rural y agrícola (Pandey et al., 2016). Así, la introducción de cultivos energéticos en los campos representa la pieza clave capaz de satisfacer las necesidades energéticas futuras de manera sostenible, limpia y neutra (Pires et al., 2019; IRENA, 2019). Sin embargo, el cultivo intensivo a gran escala de plantaciones energéticas implica aún la existencia de algunos desafíos inherentes que deben de ser destacados y cuidados. Si no se siguen adecuadamente los criterios de sostenibilidad podría originarse la pérdida de hábitats y biodiversidad, la erosión del suelo y la escasez y contaminación de acuíferos dulces (Pedroli et al., 2013; López-Bellido et al., 2014; Rahman et al., 2014; Pivato et al., 2018). Sin embargo, debe de tenerse en cuenta que los posibles efectos que pudieran desarrollarse dependen del conjunto de características circunstanciales específicas de cada región (tipo de suelo, cambios en el suelo, manejo del cultivo, etc.) (Pleguezuelo et al., 2015).

Retomar en este punto, además, que el destino de parte de la superficie para cultivos con fines energéticos no puede suponer en ningún caso una limitación para el desarrollo de tierras de cultivo con fines alimenticios (Singh and Das, 2019; Douvartzides et al., 2022). Es por esto que,

idealmente y tradicionalmente, se dedican para cultivos de biomasa las tierras marginalmente productivas, que no aportan buenos resultados de producción comercial de alimentos. Dentro de estas tierras se pueden encontrar, por ejemplo, suelos poco profundos, llanuras de inundación, suelos contaminados, antiguas parcelas de investigación o tierras de secano en regiones de regadío (Mitchel et al., 2016). Además, siguiendo la tendencia actual de los países desarrollados, se espera que disminuya la demanda de tierras de cultivo y pastos con fines alimenticios, por lo que estas tierras más favorables quedarán disponibles para el futuro asentamiento de cultivos energéticos (Fischer et al., 2010). Varias estimaciones muestran que solo en la Unión Europea la cantidad de tierra explotable para cultivos energéticos es aproximadamente 27 veces mayor (alrededor de 1,35 millones de hectáreas) que la que actualmente se cultiva (Evans, 2016), evitando así conflictos de competencia con la producción de alimentos.

En este mismo contexto de eficiencia ambiental, es importante tener en cuenta que las plantaciones forestales de rotación corta, establecidas por tanto principalmente en suelos marginales, necesitan de fertilizantes para lograr una alta producción de biomasa.

Se entiende por **fertilizante** o abono a todo material, orgánico o inorgánico, cuya función principal es proporcionar elementos nutrientes a las plantas, siendo capaces de mejorar su crecimiento en un momento dado, bien porque no existen o porque se han agotado con el tiempo. Así, el objetivo final del fertilizante es aumentar la producción y la calidad de los productos obtenidos a través de mejorar la fertilidad del suelo (Navarro and Navarro, 2014). La cantidad de materiales utilizados como abonos es muy alta, así como su composición y procedencia muy diversa. Si se establece una clasificación en base a la forma en la que se encuentra el elemento fertilizante pueden diferenciarse dos grandes grupos:

- *Fertilizantes Minerales o Inorgánicos.* Abonos cuyos nutrientes se presentan en forma mineral. Son obtenidos mediante extracción o a partir de procedimientos industriales de carácter físico o químico. Aunque su aplicación es sencilla y son fácilmente absorbidos por las plantas, su uso continuo y excesivo puede producir cambios en la estructura del suelo y contribuir a aumentar los problemas de contaminación del agua. Se componen de uno o de varios productos químicos como sales, óxidos, etc. y por convenio la ciamida cálcica y la urea se clasifican como abonos inorgánicos.

- *Fertilizantes Orgánicos*. Se consideran fertilizantes naturales. Los elementos esenciales forman parte de compuestos orgánicos de origen animal o vegetal, que se van liberando lentamente según van siendo degradados por diferentes organismos del suelo. Su aplicación suele ser directamente sobre el terreno y ejercen una gran influencia sobre el suelo, mejorando sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Dentro de este grupo se recogen por ejemplo los residuos agrícolas y ganaderos, los lodos de depuradora o el estiércol.

Estudios realizados han indicado que la aplicación de estos fertilizantes supone, junto con los carburantes quemados durante todo el proceso, el mayor coste energético de este tipo de cultivo (Ciria, 2008). Si bien es cierto que si se establecen comparaciones con cultivos energéticos agrícolas convencionales la aplicación de fertilizantes es mucho menor (Merzic et al., 2022), se ha considerado uno de los factores limitantes para las propias investigaciones realizadas en esta tesis doctoral. Es por ello que en los **Capítulos 5, 6 y 7** se pueden observar comparaciones entre la aplicación de fertilizantes inorgánicos y orgánicos en las parcelas de estudio con el fin de establecer posibles diferencias en el crecimiento de la biomasa y, en definitiva, en la energía proporcionada por las distintas especies vegetales empleadas bajo diferentes condiciones.

Cultivo energético forestal de Chopo (*Populus* sp.)

El género *Populus* pertenece a la familia Salicaceae y comprende unas 30 especies con amplia distribución natural.

Distribución geográfica.

En el Terciario inferior, cuando predominaba en la Tierra un clima subtropical o tropical cálido y extraordinariamente húmedo, al norte de las zonas templadas de Europa ya habitaba en frondosos bosques el género *Populus* (Fernández, 2001). Los chopos o álamos se han ido adaptando durante millones de años a las condiciones ambientales cambiantes, llegando a convertirse en una de las especies de árboles más extendidas en el mundo (Feng et al., 2019).

El área natural de distribución del género *Populus* se extiende por todas las regiones frías y templadas del hemisferio norte: Europa, norte de África, Asia y América del Norte, abarcando desde los 22° hasta los 70° de latitud y hasta los 4800 metros sobre el nivel del mar (Ojeda et al., 2013; Xi et al., 2021). Además, el chopo ha sido ampliamente introducido y propagado por el hemisferio sur: América del Sur, sur de África, Australia, y Nueva Zelanda. Así, actualmente ocupa desde zonas muy frías (Alaska, norte de Rusia y Siberia) hasta regiones cálidas y a veces áridas y se le considera colonizador secundario de los bosques de ribera tras los aluviones (Rueda et al., 2017).

Condiciones de cultivo.

Al conjunto de técnicas silvícolas que incluyen el cultivo del chopo de producción se le denomina populicultura (Mongil-Manso, 2018).

Las especies del género *Populus* se adaptan a una gran diversidad climática y ecológica. Se trata de plantas competidoras de luz cuya temperatura óptima de crecimiento está entre los 15°C y los 25°C (Bacher, 1998) y el rango altitudinal para su crecimiento comprende desde el nivel del mar hasta aproximadamente los 1000 metros de altitud. Los chopos cuentan con una gran vulnerabilidad al déficit hídrico (Marron et al., 2014). Su alta tasa de crecimiento está relacionada con una gran demanda de agua, por lo que su supervivencia, y productividad, dependen en gran medida de la disponibilidad de agua (Ji et al., 2020). Presentan buen crecimiento en muchos tipos de suelos, aunque tienen preferencia por las texturas franca-arenosa y franca-limosa, ya que retienen mayor cantidad de agua en el nivel freático al mismo tiempo que evitan encharcamientos frecuentes. No son muy exigentes en lo relativo a nutrientes, aunque sí pueden ser limitantes para los individuos de crecimiento más rápido. Por tanto, la fertilización del suelo con abonos orgánicos o fertilizantes químicos puede resultar decisiva. Además, dependiendo del clon estudiado, los requerimientos de pH del suelo varían desde más ácidos a neutros (entre 6 y 8), y su tolerancia a la sal también es variable (Chen and Polle, 2010).

Botánica.

Se trata de árboles y arbustos caducifolios de tronco recto o algo sinuoso (**Figura 8**). Sus hojas son simples y generalmente alternas, caedizas y con un largo peciolo. Dioicos, las

flores unisexuales carecen de perianto, presentan una estructura característica llamada disco nectarífero y se agrupan en amentos colgantes (Tíscar-Oliver, 2021).

De polinización anemófila, el fruto formado es capsular y contiene muchas semillas de pequeño tamaño provistas de penachos algodonosos blancos que favorecen su dispersión por el viento. Las semillas difícilmente germinan dado que conservan su poder germinativo solo unos días y las condiciones de establecimiento son estrictas. Sin embargo, los chopos tienen una gran capacidad para la dispersión vegetativa, especialmente por estaquillado o brotes de cepa. Una vez que los árboles están establecidos, su crecimiento es rápido y oportunista (Farmer, 1996).

El chopo como combustible.

El género *Populus* es el tercer género forestal de mayor valor económico en el mundo (Feng et al., 2019). Su amplitud ecológica y variabilidad han posibilitado en gran medida su mejora genética.

La facilidad que presentan los componentes del género *Populus* a las hibridaciones naturales ha hecho surgir a lo largo de la historia una serie de formas intermedias de gran importancia en la populicultura. Esta capacidad para reproducirse vegetativamente tiene como consecuencia que las plantas obtenidas son rigurosamente idénticas, en lo que a su genética se refiere, entre sí y con la planta de la que proceden, es decir, son clones (Nogués et al., 2010).

Los híbridos de *Populus* presentan ciertas particularidades que les hacen adecuados para ser objeto de cultivo energético (Pleguezuelo et al., 2015):

- Facilidad para el establecimiento del cultivo (propagación vegetativa a partir de esquejes de tallo, bajo costo de producción y alto porcentaje de éxito de enraizamiento).
- Se ofrece alto grado de mejora genética (el genoma de *Populus* ya está secuenciado).
- Rápido crecimiento y altos rendimientos sostenibles.
- Vuelve a crecer vigorosamente después de las operaciones de rebrote y cosecha.
- Balances energéticos positivos.
- Alta tolerancia a la competencia.
- Inmunidad o resistencia frente a enfermedades y plagas.

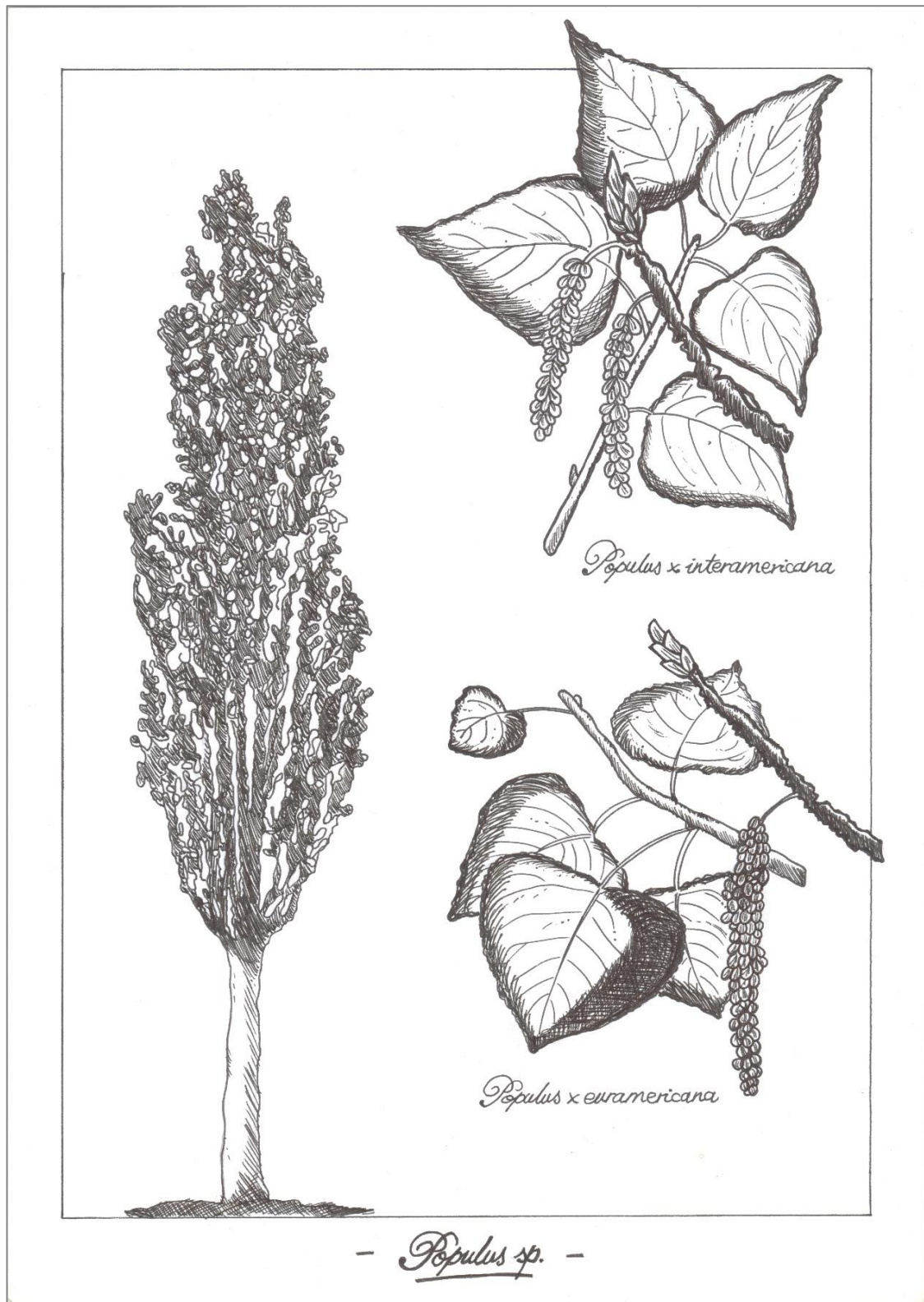


Figura 8. Ilustración de *Populus* sp. diferenciando entre los clones estudiados: *Populus x interamericana* y *Populus x euramericana*.

No obstante, cabe destacar que los rendimientos netos obtenidos en una plantación varían en gran medida entre clones (Paniagua et al., 2016). A partir de su estudio genético se ha logrado la selección de variedades con genotipos que cuentan con características óptimas para formar parte de cultivos energéticos adaptados a las condiciones edafoclimáticas de cada zona (Vanbeveren and Ceulemans, 2018; Niemczyk, 2021). Otros factores que limitan los rendimientos finales son el turno de corta (no superior a 5 años), la densidad de plantación (hasta 10000 plantas/ha) y las técnicas de cultivo empleadas (Nogués et al., 2010).

El **Capítulo 5** de esta Tesis Doctoral se centró en el estudio del aprovechamiento térmico de biomasa procedente de un cultivo energético de *Populus* sp. fertilizado orgánicamente.

Aprovechamiento Energético De nuevas Fuentes Biomásicas

A estas alturas de la presente tesis doctoral ya ha quedado claro que una solución para alcanzar los objetivos sostenibles pasa por dar una segunda vida a los residuos forestales y agrícolas. Contextualizado en los cultivos, el término **residuo** se refiere a la porción de un cultivo que no es el objetivo principal de la cosecha (García et al., 2016). En los siguientes subapartados se recogerá la información de dos especies agrícolas en expansión: la quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) y la chirimoya (*Annona cherimola* Mill.). La potencial valorización energética de los residuos agrícolas de cada una de ellas se desarrolla ampliamente en los **capítulos 6 y 7** respectivamente.

La Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)

La quinoa (*C. quinoa* Willd.) es una planta herbácea perteneciente al género *Chenopodium*, incluido en la familia Chenopodiaceae. De nombre común muy variable según la región, en la lengua Inca se la conocía como “grano madre” o quinua (Martínez, 2015).

Distribución geográfica.

Es nativa de las montañas Andinas donde ha sido cultivada desde hace más de 5000 años (García, 2003), tiempo en el que, junto con el maíz, fue uno de los alimentos fundamentales del imperio Inca (Tapia, 1982). Cayendo en el olvido y desuso durante años

(Bhargava et al., 2006), ha pasado de ser un cultivo de subsistencia de los agricultores indígenas a convertirse en los últimos tiempos en una de las principales exportaciones de Bolivia y Perú (Enzina-Zelada et al., 2017; Jaikishun et al., 2019).

Recientemente su cultivo ha sido introducido en Norte América, Europa, Asia, África y Oceanía, destacando los cultivos de países como Canadá, Inglaterra, España, China y Australia, entre otros (Aziz et al., 2018).

Condiciones de cultivo.

La quinoa crece en una amplia variedad de ambientes debido a su alta resistencia a diversos estreses bióticos y abióticos. Tal es así que estas pequeñas plantas herbáceas pueden soportar temperaturas de entre -8°C hasta 38°C (Romaní and Váldez, 2019) y ocupar las regiones comprendidas entre el nivel del mar y los 3800 metros de altitud (Risi and Galway, 1989). Se adapta a diferentes tipos de suelos, desde arenosos a arcillosos (Razzaghi et al., 2015), con pH ácido (4,5) o alcalino (9) y con concentraciones de sal próximas a las del agua del mar (Eisa et al., 2017). El régimen de precipitaciones tampoco afecta a esta planta gravemente ya que puede soportar y crecer bajo condiciones bajas de lluvia (50 mm/año) (Graf et al., 2015) y humedades relativas entre el 40% y 80% (Jaikishun et al., 2019). Además, puede adaptarse a diferentes fotoperiodos (García-Parra et al., 2020). Sin embargo, su crecimiento está influenciado por la concentración de nutrientes del terreno, especialmente el nitrógeno, por lo que va a ser necesaria la fertilización química o con materia orgánica (García-Parra et al., 2018). Las zonas expuestas a fuertes vientos tampoco son un factor favorable dado que pueden producir una rápida desecación de la planta y su encamado.

Botánica.

Se trata de una planta anual, dicotiledónea, herbácea, que dependiendo del genotipo y las condiciones edafoclimáticas puede crecer entre los 0,5 m y los 3,0 m. El tallo es cilíndrico en la zona baja y anguloso en la superior, con una corteza firme formada por tejidos lignificados (Morillo-Coronado et al., 2021) (**Figura 9**). Las hojas son simples, enteras, glabras, pecioladas, alternas y de carácter polimórfico, siendo las basales grandes y romboidales y las

superiores pequeñas y lanceoladas (Tapia et al., 1979). La coloración de la planta es variable, desde el verde al rojo, y del amarillo al violeta (Melerose et al., 2016).

La raíz de la planta desarrollada está densamente ramificada y, dependiendo de la localización y variedad, su profundidad puede alcanzar hasta 1,5 m (Tapia et al., 1979).

Las flores son pequeñas, incompletas (carecen de pétalos) y ubicadas en glomérulos. Son sésiles, poco llamativas y pueden ser hermafroditas, pistiladas o androstériles. El porcentaje de cada tipo de flor depende del genotipo, y presentan asincronía (Abdelbar, 2018).

El fruto es un aquenio de forma elipsoidal o redondo, liso, de color variable y con un tamaño de entre 1 mm y 2,5 mm de diámetro (Wahli, 1990). Se conoce como pseudocereal porque estas semillas tienen apariencia de grano y su cosecha y consumo recuerda a los cereales (Enzina-Zelada et al., 2017).

Metabolitos clave.

La quinoa ha sido conocida y utilizada desde tiempos remotos por su excelencia nutricional. Su elevado potencial nutritivo procede de un inusual balance proteínas-lípidos-carbohidratos, con datos aproximados de $\pm 16\%$ proteínas, $\pm 4-9\%$ lípidos y $\pm 64\%$ hidratos de carbono (Vega et al., 2010). Además de este extraordinario aporte de proteínas, cabe destacar que la quinoa es la única planta que posee y provee todos los aminoácidos esenciales (Flívia et al., 2017). Otros componentes son agua ($\pm 10\%$), fibra ($\pm 10\%$), ácidos grasos omega 3, 6 y 9 ($\pm 9\%$), minerales y vitaminas (Nowak et al., 2016).

Además de su composición nutricional cabe destacar su riqueza en metabolitos secundarios, tales como flavonoides, compuestos fenólicos y esteroides vegetales. Entre todos ellos, el componente más característico de *Chenopodium quinoa* son las saponinas. Contenidas en la cáscara, raíz, tallo y hojas, están constituidas estructuralmente por un anillo triterpenoide al que se unen uno, dos o tres oligosacáridos mediante enlaces o-glucosídicos (Morillo-Coronado et al., 2021). Son las responsables de su sabor amargo (Cheek et al., 2014) y se han identificado al menos treinta saponinas diferentes (Ahumada et al., 2016). Son consideradas como sustancias antinutricionales junto con el ácido fítico, taninos e inhibidores de proteasas (Vega-Gálvez et al., 2010).



Figura 9. Ilustración de *Chenopodium quinoa* Willd.

Propiedades médicas.

El uso de quinoa con fines médicos ha sido también ampliamente reportado. Los metabolitos contenidos en las semillas poseen actividades farmacológicas sustanciales (Montes et al., 2020). En muchos estudios, el consumo de quinoa se ha relacionado con la protección del organismo frente al riesgo de sufrir enfermedades cardiovasculares y neurodegenerativas (Youdim et al., 2004; Tang. et al., 2015), cáncer (Rice-evans and Packer, 1998), hipercolesterolemia (Navarro-Pérez et al., 2017), alergia o enfermedades inflamatorias (Kuljanabhagavad and Wink, 2009). Además, mejora los valores de glucosa en pacientes que padecen diabetes (Li and Zhu, 2018) y poseen actividad diurética, antimicótica, antiviral y de protección gástrica (Graf et al., 2015; Vega-Gálvez et al., 2010; Stikic et al., 2012).

La quinoa como combustible.

A pesar de ser inicial y erróneamente considerada una especie de subsistencia de pequeños agricultores, la quinoa es una de las especies más promisorias para hacer frente a las consecuencias que el cambio climático está trayendo consigo a nivel mundial (Morillo-Coronado et al., 2021). Esto es así no solo por sus excelentes propiedades nutricionales y su contenido en importantes componentes bioactivos, sino principalmente por su capacidad de adaptación y crecimiento bajo condiciones agroclimáticas extremadamente adversas (Li y Zhu, 2018).

La importancia económica, nutricional y social que ha adquirido ha suscitado un notable incremento de sus áreas de siembra alrededor del mundo. Sin embargo, toda la atención se ha centrado en el rendimiento de la semilla y su potencial uso como cultivo ideal para contribuir a la seguridad alimentaria del siglo XXI, olvidando que el cultivo de quinoa trae consigo, tras la cosecha y trilla, la producción de un alto porcentaje de residuos como paja y rastrojo. En lo que respecta a estos subproductos de la quinoa se ha explorado poco (Matías et al., 2021). Antiguamente estos residuos se utilizaban como forraje para la alimentación de ganado vacuno, ovino y caprino, pero estudios más recientes han determinado que los tallos de la quinoa no tienen valor en cuanto a la nutrición animal (Filik, 2020).

Teniendo en cuenta que la paja de la quinoa se produce a razón de ocho veces la producción del grano (Carrasco et al., 2015), lo que se traduce en hasta 15000 kg (dependiendo de la variedad y las condiciones de cultivo) de paja por cada hectárea cultivada (Hernangómez, 2021), no dar uso a este residuo supone problemas de acumulación y gestión para los agricultores y, en definitiva, para el medio ambiente.

No obstante, retomando la biología y composición de esta herbácea, los tallos se caracterizan por su robusta estructura lignificada, lo que convierte a esta paja en una fuente de materia lignocelulósica de la que obtener energía. Así es como se encaminó el potencial de la quinoa como combustible biomásico (**Capítulo 6** de la presente Tesis Doctoral), obteniendo energía renovable al mismo tiempo que se revalorizaba un residuo agrícola.

La Chirimoya (*Annona cherimola* Mill).

El chirimoyo (*A. cherimola*, Mill) es un árbol frutal incluido en el género *Annona*, perteneciente a la familia *Annonaceae*. El nombre *Annona* descende del latín “cosecha anual”, mientras que chirimoya procede del quechua: chiri- “frío, fría” y –muya “semilla” (Lizana and Reginato, 1990).

Distribución geográfica.

La chirimoya es una especie fundamentalmente presente en las regiones tropicales y subtropicales del planeta. Desde sus orígenes americanos andinos ((Safford, W.E., 1917), fue introducida en la España continental en los siglos XVI y XVIII, desde donde se distribuyó a Italia, Portugal, las Islas Canarias, Argelia y Egipto (Morton, 1987). Actualmente ocupa también la mayoría de las zonas tropicales de Asia, incluyéndose India, Singapur y Tailandia (Behr, 1992) y su cultivo comercial es de gran importancia en Egipto, Chile, Israel, Florida, California y, especialmente, España (Jorge León, 2000) que se posiciona como el mayor productor de chirimoya a nivel mundial (Perrone et al., 2022).

Condiciones de cultivo.

El chirimoyo requiere de climas secos, donde no llueva mucho, y donde la temperatura sea suave, sin extremos de calor y/o frío. La temperatura es uno de los factores determinantes para el desarrollo correcto del árbol, siendo condiciones ideales de floración una temperatura promedio de entre 25° y 28°C con humedades relativas altas, entre el 60% y el 80%. Es una especie muy susceptible al frío y temperaturas de cultivo por debajo de 14°C pueden ocasionar daños irreparables (Gottsberger et al., 1989).

Sin embargo, es una especie que se adapta a diferentes condiciones de suelo. Siempre que estén debidamente drenados, va a poder crecer en suelos arenosos, limosos, arcillosos o pedregosos (González-Vega, 2013) y preferiblemente de neutros a ligeramente alcalinos (pH entre 6,5 y 8). Respecto a la salinidad, se cataloga como una especie sensible al estrés salino, siendo un importante factor limitante de su crecimiento. Además, comúnmente ocupa suelos pobres en nutrientes, por lo que es necesaria la aplicación de materia orgánica y/o fertilizantes químicos en dosis adecuadas en función de análisis iniciales (Sanewski, 1988). Varios trabajos (Encina et al., 1994; Azcón et al., 1994) han definido esta especie como micotrófila, es decir, que para alcanzar su óptimo crecimiento requiere su asociación con hongos como *Glomus desertícola* para la formación de micorrizas en sus raíces.

Con respecto a la luz, el chirimoyo es un árbol muy competitivo. De este modo, la poda es vital para el correcto desarrollo de la producción de estos cultivos. Se aconseja efectuar una poda cuidadosa de formación, desde el primer año del árbol hasta el quinto, obteniendo así un árbol bien formado y de porte equilibrado. A partir del quinto año debe de mantenerse una poda anual de fructificación con el objetivo de conseguir frutos de buen tamaño y de una calidad óptima (Ibar, 1979).

Botánica.

Es un árbol pequeño que alcanza hasta ocho metros de altura, de porte erguido y copa abierta (**Figura 10**). Su tallo es cilíndrico, con una gruesa corteza, y se ramifica en multitud de ramas de las que brotan hojas verdes alternas, ovadas a elípticas, de 10 a 20 cm de largo y de 4 a 8 cm de ancho (Bridg, 2000). Presenta un crecimiento lento y es semicaducifolio, es decir,

las hojas comienzan a caer parcialmente con la llegada de la época fría pero su mayoría permanecen en el árbol hasta la floración, cuando las yemas comienzan a elongarse (Sawneski, 1988).

Posee un sistema radicular poco profundo y ramificado, organizado en dos o tres planos de raíces superficiales (Moreno, 1987).

La flor es hermafrodita y está formada por tres sépalos y dos series de pétalos poco llamativos, externos e internos. Puede aparecer solitaria o en ramilletes de dos o tres. Su pedúnculo es corto y está inclinado (Guirado et al., 2004). En su centro se diferencia un gineceo piramidal, compuesto por hasta trescientos carpelos (cada uno con un óvulo), rodeado por los estambres. Los órganos femeninos y masculinos no maduran de forma simultánea, impidiendo la autofecundación. Esta dicogamia y protoginia marcada es la característica más importante de esta especie (Wester, 1910). La floración se produce una vez al año, aunque su momento difiere según la localidad.

Entre uno y dos días después de la fecundación, los pétalos se caen y comienza el desarrollo del fruto. Los carpelos fecundados, cada uno con una semilla, alcanzan la madurez de seis a diez meses después (Jorge León, 2000). La morfología final es cónica o en forma de corazón, relleno de una pulpa blanca, jugosa y de sabor subácido. La piel puede ser lisa o presentar areolas o placas. La forma de estas placas constituye en sí mismo un rasgo distintivo, diferenciándose hasta cuatro formas principales: hendida, tuberculata, mamillata y umbonata (Schroeder, 1943). Su peso oscila entre los 200 y los 700 g y su longitud comprende entre 7,5 y 12 cm (Popenoe, 1974). En su interior, embebidas en la pulpa, hay entre 21 y 41 semillas aplanadas de color castaño o negro, con un tamaño entre 1,5 a 2.0 cm de largo y alrededor de 1 cm de ancho (Manica, 1997). El fruto es climatérico y muy frágil, dificultando su comercialización.

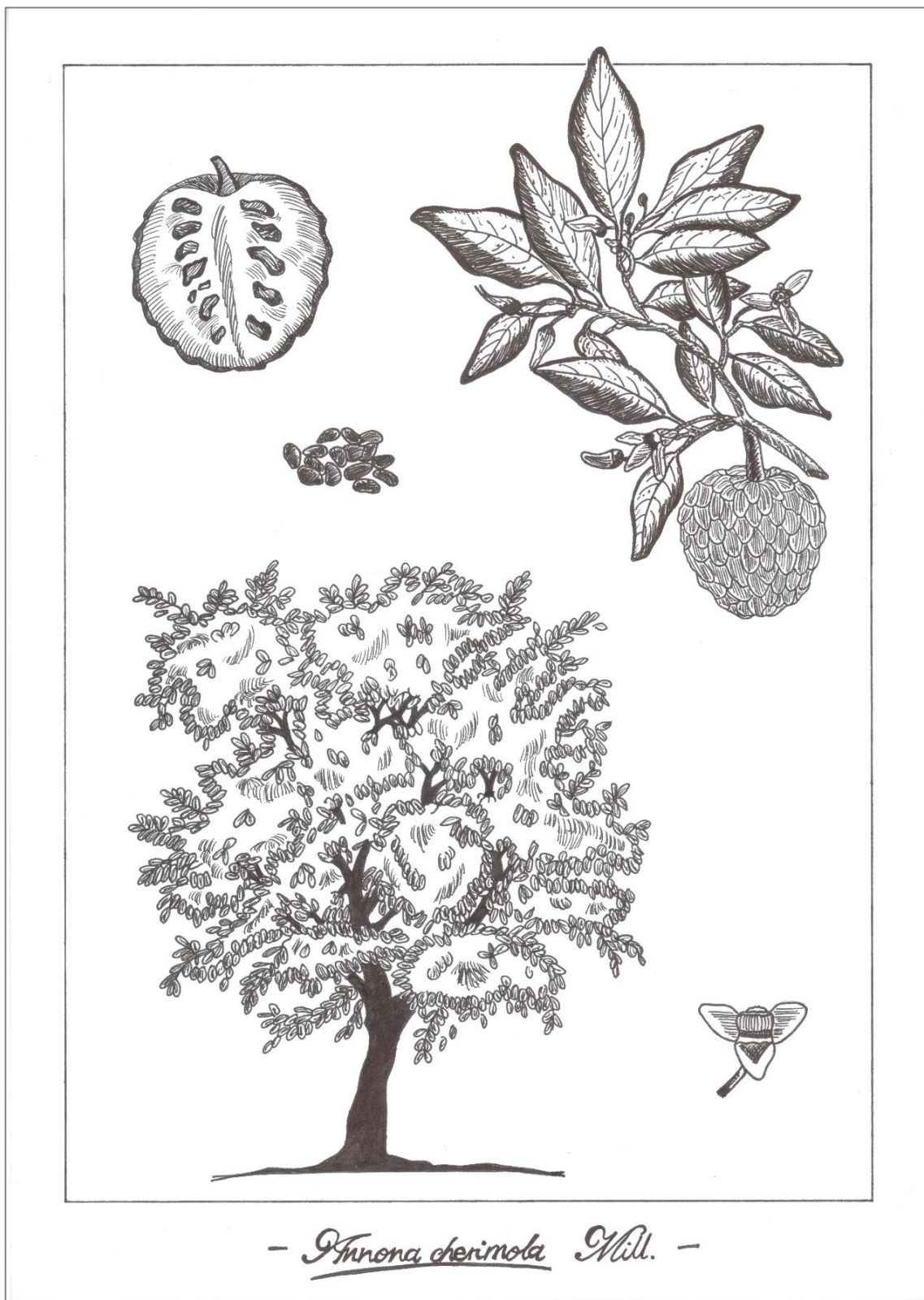


Figura 10. Ilustración de *Annona cherimola* Mill.

Metabolitos clave.

El fruto de la chirimoya destaca por su alto contenido en agua ($\approx 75,5\%$ del peso) y carbohidratos ($\approx 22\%$), entre los que predominan la fructosa y la sacarosa. En cambio, el aporte de fibra ($< 2\%$), proteínas ($< 1\%$) y grasas ($< 0,1\%$) es muy bajo. En cuanto a los minerales, posee un contenido significativo de fósforo, calcio y hierro (Kawamata, 1977). Además de sus valores propiamente nutricionales, los frutos y hojas de este árbol aportan una gran diversidad de componentes bioactivos (Perrone et al., 2022). Se conoce como componente bioactivo a aquel constituyente intrínseco de una planta, no nutriente, que desencadena efectos beneficiosos y/o tóxicos sobre el organismo una vez ingeridos (Haykal et al., 2019). En general, la chirimoya contiene componentes bioactivos en raíces, hojas, ramas, corteza, semillas y pulpa (Yahia, E.M, 2017). Existen multitud de investigaciones en las que se identifican estos componentes de familias químicas tan diversas como alcaloides, amidas, vitaminas, policétidos (acetogeninas), polifenoles (flavonoides, taninos, lignanos), tocoferoles, fitoesteroles y terpenos e isoprenoides (cauranos, luteína, β -criptoxantinas, β -carotenos), entre otros (Chen et al., 1999; Guillopé et al., 2011; Albuquerque et al., 2016; Diaz-de-Cerio et al., 2018; Mannino et al., 2020; Vassari et al., 2020).

Propiedades médicas.

Los frutos y componentes del chirimoyo se han utilizado como ingrediente común desde la civilización Inca por sus importantes aplicaciones en la medicina tradicional (Loizzo et al., 2012).

La gran variedad de metabolitos diferentes presentes en las diversas estructuras del chirimoyo le confieren propiedades beneficiosas frente a multitud de enfermedades degenerativas y crónicas en humanos, como la diabetes (Martínez-Solís et al., 2021), el cáncer (Welé et al., 2005; Fuel et al., 2021; Haykal et al., 2021), el Alzheimer (Galarce-Bustos et al., 2019), la hipercolesterolemia (Falé et al., 2013), y las úlceras gástricas (Mohammed et al., 2020). Además, destaca por sus efectivas propiedades antimicrobianas (Rios et al., 2003; Calzada et al., 2017; Nugraha et al., 2019)

La chirimoya como combustible.

De manera análoga a la quinoa, el cultivo de chirimoya se encuentra actualmente en expansión debido a la popularidad creciente de sus propiedades terapéuticas y por su alta capacidad de adaptación a climas secos (Jamkhande et al., 2017).

El cultivo de chirimoya viene asociado a la generación de residuos forestales fundamentalmente de dos tipos. El primero de ellos está relacionado con las actividades de poda y mantenimiento de los chirimoyos y el segundo con los restos que se desprenden del procesado de sus frutos.

El chirimoyo es un árbol frutal que requiere de técnicas de poda anual gracias a las cuales se da forma al árbol para favorecer su desarrollo (Cautín et al., 1999) y se mejora su productividad (Olesen and Muldoon, 2009). Como consecuencia, se derivan grandes cantidades de madera, en torno a 200 kg de cada árbol, que habitualmente son quemados directamente. Del mismo modo, tras el procesado de los frutos para obtener la codiciada pulpa para zumos, mermeladas, cremas, etc., las industrias alimentarias y farmacéuticas descartan las semillas que estaban embebidas en ella (Menezes et al., 2019). Teniendo en cuenta que cada fruto contiene una media de entre 21 y 41 semillas (Perrone et al., 2022), lo que representa casi el 30% del peso total de ese fruto (Bapat et al., 2020), la cantidad final resultante de estos residuos es elevada. Anteriormente, otros autores han intentado valorizar estas semillas tratando de obtener un biocombustible a partir de su contenido en aceites, pero los resultados no fueron satisfactorios debido a que su viscosidad ponía en peligro los motores (Chuquilín-Goicochea et al., 2020).

Dado que sus propiedades y composición en biomasa lignocelulósica y aceites los hacen claros candidatos para su valorización energética por procesos termoquímicos, es importante desarrollar este campo que, además de proporcionar una fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles, permite la gestión sostenible de los residuos.

Referencias Bibliográficas

- Abdelbar, O. H. (2018). Flower vascularization and fruit developmental anatomy of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Amaranthaceae. *Annals of Agricultural Sciences*, 63(1), 67-75. <https://doi.org/10.1016/j.aosas.2018.05.002>
- Ahumada, A., Ortega, A., Chito, D. y Benítez, R. (2016). Saponinas de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.): un subproducto con alto potencial biológico. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, 45(3), 438. <https://doi.org/10.15446/rcciQUIFA.v45n3.62043>
- Alatzas, S., Moustakas, K., Malamis, D. y Vakalis, S. (2019). Biomass potential from agricultural waste for energetic utilization in Greece. *Energies*, 12(6), 1095. <https://doi.org/10.3390/en12061095>
- Albuquerque, T. G., Santos, F., Sanches-Silva, A., Beatriz Olivera, M., Bento, A. C. y Costa, H. S. (2016). Nutritional and phytochemical composition of *Annona cherimola* Mill. fruits and by-products: potential health benefits. *Food Chemistry*, 193, 187-195. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.06.044>
- Amjith, L. R. y Bavanish, B. (2022). A review on biomass and wind as renewable energy for sustainable environment. *Chemosphere*, 293, 133579. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133579>
- Antal, M. J. J. y Várhegyi, G. (1995). Cellulose Pyrolysis Kinetics: The Current State of Knowledge. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 34(3), 703-717. <https://doi.org/10.1021/ie00042a001>
- Antar, M., Lyu, D., Nazari, M., Shah, A., Zhou, X., y Smith, D. L. (2021). Biomass for a sustainable bioeconomy: An overview of world biomass production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110691. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110691>
- Ardila, M. A., López, A., Lozano, L. F. y Gil, E. (2021). *Gasificación de briquetas de carbón con biomasa: Una alternativa energética sostenible*. UPTC.
- Azcón, C., Encina, C., Azcón, R. y Barea, J. M. (1994). Effect of arbuscular Micorrizha on the growth and development of micropropagated *Annona cherimola* plants. *Agricultural and Food Science*, 3(3), 281-288. <https://doi.org/10.23986/afsci.72706>
- Aziz, A., Akram, N.A. y Ashraf, M. (2018). Influence of natural and synthetic vitamin C (ascorbic acid) on primary and secondary metabolites and associated metabolism in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) plants under water deficit regimes. *Plant Physiology and Biochemistry*, 123, 192-203. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.12.004>
- Bapat, V. A., Jagtap, U. B., Ghag, S. B. y Ganapathi, T. R. (2020). Molecular approaches for the improvement of under-researched tropical fruit trees: Jackfruit, guava, and custard apple. *International Journal of Fruit Science*, 20(3), 233-281. <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1621236>
- Barrera, J. C., Ramírez-Contreras, N. E. y García-Núñez, J. A. (2018). Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria de la palma de aceite. *Palmas*, 39(4), 24-44.
- Basu, P. (2018). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction – Practical Design and Theory (3rd. ed)*. Elsevier: Academic Press.
- Behr, H. (1992). Obstbau auf Madeira. Cherimoyas statt Bananen. *Erwerbsobstbau*, 34, 21-23.
- Bhargava, A., Hukla, S. y Ohri, D. (2006). *Chenopodium quinoa*: an Indian perspective. *Industrial Crop and Products*, 23(1), 73-87. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.04.002>
- Biswas, B., Pandey, N., Bisht, Y., Singh, R., Kumar, J. y Bhaskar, T. (2017). Pyrolysis of agricultural biomass residues: Comparative study of corn cob, wheat straw, rice straw and rice husk. *Bioresour. Technol.*, 237, 57-63. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.046>
- Brethauer, S., Shahab, R. L., y Studer, M. H. (2020). Impacts of biofilms on the conversion of cellulose. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104, 5201-5212. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10595-y>
- Bridg, H. (2000). *Micropropagation and determination of the in vitro stability of Annona cherimola* Mill. and *Annona muricata* L. [Tesis de maestría, Universidad de Berlín] <https://doi.org/10.18452/14481>

- Calzadax, F., Calzada, F., Solares-Pascasio, J. I., Ordoñez-Razox ,R. M., Ordoñez-Razo, R. M., Velazquez, C., Barbosa, E., García-Hernández, N., Mendez-Luna, D. y Correa-Basurto, J. (2017). Antihyperglycemic Activity of the Leaves from *Annona cherimola* Miller and Rutin on Alloxan-induced Diabetic Rats. *Pharmacognosy Reseach*, 9(1), 1-6. <https://doi.org/10.4103/0974-8490.199781>
- Carrasco, C., Cuno, D., Carlqvist, K., Galbe, M. y Lidén, G. (2015). SO₂-catalysed steam pretreatment of quinoa stalks. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 90, 64-71. <https://doi.org/10.1002/jctb.4286>
- Cautín, R., Fassio, C. y Ovalle, A. (1999). *Productive behaviour of fruiting wood in three systems of trellis systems in cherimoya (Annona cherimola Mill.)*. In First International Symposium on Cherimoya 497, 315-330. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1999.497.17>
- Ciferno, J. P. y Marano, J. J. (2002). *Benchmarking Biomass Gasification Technologies for Fuels, Chemicals and Hydrogen Production*. Department of Energy NETL of US.
- Ciria, M. P. (2008). *El ciclo de la vida de la producción de biomasa (energía y emisiones)*. III Congreso Internacional de Bioenergía: La bioenergía y el desarrollo rural, CD, Aveboim, Valladolid.
- Chao, Z., Liu, N., Zhangb, P., Yingc, T. y Kaihui, C. (2019). Estimation methods developing with remote sensing information for energy crop biomass: A comparative review. *Biomass and Bioenergy*, 122, 414-425. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.02.002>
- Charisiou, N. D., Konstantakou, P. P. y Papadakis, V. G. (2016). Exploitation of olive tree pruning as raw material for the production of high quality compost. *Environmental Engineering and Management Journal*, 15, 2709-2717.
- Chen, C. Y., Chang, F. R., Chiu, H. F., Wu, M. J. y Wu, Y. C. (1999). Aromin-A, an annonaceous acetogenin from *Annona cherimola*. *Phytochemistry*, 51(3), 429-433. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(99\)00002-3](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(99)00002-3)
- Chen, S. y Polle, A. (2010). Salinity tolerance of *Populus*. *Plant Biology*, 12(2), 317-333. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2009.00301.x>
- Cheok, C. Y., Salman, H. A. K. y Sulaiman, R. (2014). Extraction and quantification of saponins: A review. *Food Research International*, 59, 16-40. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.057>
- Cho, S. y Kim, J. (2019). Multi-site and multi-period optimization model for strategic planning of a renewable hydrogen energy network from biomass waste and energy crops. *Energy*, 185, 527-540. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.053>
- Chuquilín-Goicochea, R., Msc, P. C., Bs, P. A. L. E. y Obregón, H.A. (2000). Optimization and physical characterization of biodiesel obtained from *Annona cherimola* waste oil. *Residuos*, 9(12), 13. <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.208>
- Collard, F.X. y Blin, J. (2014). A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 594-608. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.06.013>
- Cumplido-Marin, L., Graves, A. R., Burgess, P. J., Morhart, C., Paris, P., Jablonowski, N. D., Facciotto, G., Bury, M., Martens, R. y Nahm, M. (2020). Two novel energy crops: *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby and *Silphium perfoliatum* L. - State of knowledge. *Agronomy*, 10(7), 928. <https://doi.org/10.3390/agronomy10070928>
- Curbelo, A., Aba, J. L., Sosa, R., Suárez, Y., Rodríguez, A., Martínez, A., Suarez, J., Garea, B., Cepero L. y Sotolongo, J. A. (2021). *Oportunidades y limitaciones para el desarrollo de la Bioenergía por pequeños y medianos productores agrícolas*. Proyecto Bioenergía -Cubaenergía y Estación Experimental Indio Hatuey.
- Dahmen, N., Lewandowski, I., Zibek, S. y Weidtmann, A. (2019). Integrated Lignocellulosic value chains in a growing bioeconomy: Status quo and perspectives. *GCB Bioenergy*, 11, 107-117. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12586>

- Daioglou, V., Doelman, J. C., Wicke, B., Faaij, A. y Van Vuuren, D.P. (2019). Integrated assessment of biomass supply and demand in climate change mitigation scenarios. *Global Environmental Change*, 54, 88-101. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.11.012>
- Demura, T. y Ye, Z. H. (2010). Regulation of plant biomass production. *Current Opinion in Plant Biology*, 13(3), 298-303. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2010.03.002>
- Díaz-de-Cerio, E., Aguilera-Saez, L. M., Gómez-Caravaca, A.M., Verardo, V., Fernández-Gutiérrez, A., Fernández, I. y Arráez-Román, D. (2018). Characterization of bioactive compounds of *Annona cherimola* L. leaves using a combined approach based on HPLC-ESI-TOF-MS and NMR. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 410, 3607-3619. <https://doi.org/10.1007/s00216-018-1051-5>
- Di Donato, P., Finore, I., Poli, A., Nicolaus, B. y Lama, L. (2019). The production of second generation bioethanol: The biotechnology potential of thermophilic bacteria. *Journal of cleaner production*, 233, 1410-1417. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.152>
- Douvartzides, S., Charisiou, N. D., Wang, W., Papadakis, V. G., Polychronopoulou, K. y Goula, M. A. (2022). Catalytic fast pyrolysis of agricultural residues and dedicated energy crops for the production of high energy density transportation biofuels (part II). *Renewable energy*, 189, 315-338. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.106>
- Dubois, O. (2011). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture: managing systems at risk*. Earthscan.
- Durango Padilla, E. R., Berastegui Barranco, C. y Mendoza Fandiño, J. M. (2019). Efecto de la adición de aglomerantes en las propiedades mecánicas de los pellets de biomasa. *Ingeniare, Revista Chilena de Ingeniería*, 27(1), 83-88. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052019000100083>
- Eisa, S. S., Eid, M. A., Abd, E. S., Hussin, S. A., Abdel-Ati, A. A., El-Bordeny, N. E., Ali, S. H., Al-Sayed, H. M. A., Lofty, M. E., Masoud, A. M., El-Naggar, A. M. y Ebrahim, M. (2017). *Chenopodium quinoa* Willd. a new cash crop halophyte for salines regions of Egypt. *Australian Journal of Crop Science*, 11(3), 343-351.
- El Bassam, N. (1998). *Energy plant species - Their use and impact on environment and development*. James & James.
- Elias, X. (2005). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Días de Santos.
- Elias, X. (2012). *Biomasa y Bioenergía*. Ediciones Días de Santos.
- Encina C. L., Azcon, R. y Barea, J. M. (1994) Mycotrophy of *Annona cherimola* and the morphology of its mycorrhizae. *Micorrhyza*, 4, 161-168. <https://doi.org/10.1007/BF00203534>
- Encina-Zelada, C., Cadavez, V., Pereda, J., Gómez-Pando, L., Salvá-Ruíz, B., Teixeira, J.A., Ibañez, M., Liland, K. H. y Gonzales-Barron, U. (2017). Estimation of composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) grains by Near-Infrared Transmission spectroscopy. *LWT – Food Science and Technology*, 79, 126-134. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.01.026>
- Eom, I. Y., Kim, K. H., Kim, J. Y., Lee, S. M., Yeo, H. M., Choi, I. G. y Choi, J. W. (2011). Characterization of primary thermal degradation features of lignocellulosic biomass after removal of inorganic metals by diverse solvents. *Bioresource Technology*, 102, 3437–3444. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.056>
- Estrada, C. A. y Meneses, A. Z. (2004). Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. *Scientia et Technica*, 2(25). <https://doi.org/10.22517/23447214.7229>
- European Commission. (2017). *Cap Context Indicators 2014–2020 - Agriculture and Rural Development*. European Commission: Brussels, Belgium, 190–191.
- Evans, H. (2016). *Bioenergy Crops in the UK: Case Studies of Successful Whole Farm Integration Evidence Pack*. Energy Technology Institute.
- Falé, P. L., Ferreira, C., Maruzzella, F., Florêncio, M. H., Frazão, F. N. y Serralheiro, M. L. (2013). Evaluation of cholesterol absorption and biosynthesis by decoctions of *Annona cherimola* leaves. *Journal of ethnopharmacology*, 150(2), 718-723. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2013.09.029>
- Farmer Jr., R. E. (1996). The genecology of *Populus*. *Biology of Populus and its implications for management and conservation, (Part I)*, 33-55.

- Feng, Z., Shang, B., Gao, F. y Calatayud, V. (2019). Current ambient and elevated ozone effects on poplar: A global meta-analysis and response relationships. *Science of the Total Environment*, 654, 832-840. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.179>
- Fernández, J. J. L. (2001). *Bosques naturales de Asturias*. Universidad de Oviedo.
- Fernandez, M., Alaejos, J., Andivia, E., Madejon, P., Dias, M. J. y Tapias, R. (2020). Short rotation coppice of leguminous tree *Leucaena* spp. Improves soil fertility while producing high biomass yields in Mediterranean environment. *Industrial Crops and Products*, 157: 112911. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112911>
- Fernández-González, J., Gutierrez-Martín, F., Del Río-González, P., San Miguel-Alfaro, G., Bahillo-Ruiz, A., Sánchez-Hervás, J. M., Ballesteros-Perdices, M., Vázquez-Minguela, J. A., Rodríguez-Antón, L. M. y Aracil-Mira, J. (2015). *Tecnologías para el uso y transformación de la biomasa energética*. MundiPrensa.
- Fernando, A. L., Costa, J., Barbosa, B., Monti, A. y Rettenmaier, N. (2018). Environmental impact assessment of perennial crops cultivation on marginal soils in the Mediterranean Region. *Biomass and Bioenergy*, 111, 174-186. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.04.005>
- Filik, G. (2020). Biodegradability of quinoa stalks: The potential of quinoa stalks as a forage source or as biomass for energy production. *Fuel*, 266, 117064. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117064>
- Fischer, G., Prieler, S., Van Velthuisen, H., Berndes, G., Faaij, A., Londo, M. y de Wit, M. (2010). Biofuel production potentials in Europe: sustainable use of cultivated land and pastures, part II: land use scenarios. *Biomass Bioenergy*, 34(2), 173-184. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.07.009>
- Flívía, F de J. S., Julia, E. A de S., Nara, O. S. S., Carlos, R. S. y Thais, F de J. (2017). Standardizing germination test for quinoa seeds. *African Journal of Agricultural Research*, 12(3), 155-160. <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11820>
- Fuel, M., Mesas, C., Martinez, R., Ortiz, R., Quinonero, F., Prados, J., Porres, J. M. y Melguizo, C. (2021). Antioxidant and antiproliferative potential of ethanolic extracts from *Moringa oleifera*, *Tropaeolum tuberosum* and *Annona cherimola* in colorectal cancer cells. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 143, 112248. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.112248>
- Galarce-Bustos, O., Pavón-Pérez, J., Henríquez-Aedo, K. y Aranda, M. (2019). An improved method for a fast screening of α -glucosidase inhibitors in cherimoya fruit (*Annona cherimola* Mill.) applying effect-directed analysis via high-performance thin-layer chromatography-bioassay-mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1608, 460415. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2019.460415>
- García, A., Gandini, A., Labidi, J., Belgacem, N. y Bras, J. (2016). Industrial and crop wastes: A new source for nanocellulose biorefinery. *Industrial Crops and Products*, 93, 26-38. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.06.004>
- García-Parra, M. Á., Plazas-Leguizamón, N. Z., Carvajal-Rodríguez, D. C., Ferreira-Torrado, S. C. y Parra, J. D. (2018). Descripción de las saponinas en quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) en relación con el suelo y el clima: Una revisión. *Informador Técnico*, 82(2), 241. <https://doi.org/10.23850/22565035.1451>
- Garolera De Nucci, L. P., Tonatto, J., Iñigo Martinez, M. E., De Boeck, G., Cárdenas, G. y Romero, E. (2020). Sorgo azucarado: estudio ambiental y potencial uso para producción de bioetanol. *Revista industrial y agrícola de Tucumán*, 97(2), 17-23.
- Gavrilescu, M. (2008). Biomass power for energy and sustainable development. *Environmental Engineering and Management Journal*, 7(5), 617-640.
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N. y Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy strategy reviews*, 24, 38-50. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>
- Gokcol, C., Dursun, B., Alboyaci, B. y Sunan, E. (2009). Importance of biomass energy as alternative to other sources in Turkey. *Energy Policy*, 37(2), 424-431. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.057>
- Gómez, L. (2016). *Guía del cultivo de la quinoa*. FAO y Universidad Agraria La Colina.

- Gómez, A., Klose, W. y Rincón, S. (2008). *Pirólisis de biomasa: cuesco de palma de aceite*. University press GmbH.
- González Vega, M. E. (2013). Chirimoya (*Annona cherimola* Miller), frutal tropical y sub-tropical de valores promisorios. *Cultivos Tropicales*, 34(3), 52-63.
- Gottsberger, G. (1989). Beetle pollination and flowering rhythm of *Annona* spp. (Annonaceae) in Brazil. *Plant Systematics and Evolution*, 167(3-4), 165-187. <https://doi.org/10.1007/BF00936404>
- Graf, B. L., Rojas-Silva, P., Rojo, L. E., Delatorre-Herrera, J., Baldeon, M. E. and Raskin, I. (2015). Innovations in health value and functional food development of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(4), 431-445. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12135>
- Guillopé R., Escobar-Khondiker, M., Guérineau, V., Laprévotte, O., Höglinger, G. U. y Champy, P. (2011). Kaurenoic acid from pulp of *Annona cherimola* in regard to Annonaceae-induced Parkinsonism. *Phytotherapy Research*, 25(12), 1861-1864. <https://doi.org/10.1002/ptr.3508>
- Guirado, E., Hermoso, J. M., Pérez, M. A. y Farré, J. M. (2004). *Introducción al cultivo del chirimoyo*. Caja Rural de Granada.
- Haase, M., Rösch, C. y Ketzler, D. (2016). GIS-based assessment of sustainable crop residue potentials in European regions. *Biomass and Bioenergy*, 86, 156-171. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.01.020>
- Hamelin, L., Borzęcka, M., Kozak, M. y Pudełko, R. (2019). A spatial approach to bioeconomy: Quantifying the residual biomass potential in the EU-27. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 100, 127-142. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.017>
- Haykal, T., Nasr, P., Hodroj, M. H., Taleb, R. I., Sarkis, R., Moujabber, M. N. E. y Rizk, S. (2019). *Annona cherimola* seed extract activates extrinsic and intrinsic apoptotic pathways in leukemic cells. *Toxins*, 11(9), 506. <https://doi.org/10.3390/toxins11090506>
- Haykal, T., Younes, M., El Khoury, M., Ammoury, C., Tannous, S., Hodroj, M. H., Sarkis, R., Garsilova, N., Menin, L. y Rizk, S. (2021). The pro-apoptotic properties of a phytonutrient rich infusion of *A. cherimola* leaf extract on AML cells. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 140, 111592. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.111592>
- Hernangómez, A. 2021. Estudio comparativo del cultivo de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) entre las modalidades de agricultura convencional y ecológica [Trabajo fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid].
- Hosseini, S. E. (2022). Transition Away from Fossil Fuels Toward Renewables: Lessons from Russia-Ukraine Crisis. *Future Energy*, 1, 2-5.
- Ibar, L. (1979). *Aguacate, chirimoyo, mago, papaya*. Biblioteca Agrícola Aedos.
- Ibitoye, S. E., Jen, T. C., Mahamood, R. M. y Akinlabi, E. T. (2021). Densification of agro-residues for sustainable energy generation: an overview. *Bioresources and Bioprocessing*, 8(1), 1-19. <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00427-w>
- IRENA. 2019. *Transforming the energy system and holding the line on the rise of global temperatures*. International Renewable Energy Agency.
- Jaikishun, S., Li, W., Yang, Z y Song, Z. (2019). Quinoa: In perspective of global challenges. *Agronomy*, 9(4), 1-15. <https://doi.org/10.3390/agronomy9040176>
- Jamkhande, P. G., Ajgunde, B. R., and Jadge, D. R. (2017). *Annona cherimola* Mill. (Custard apple): A review on its plant profile, nutritional values, traditional claims and ethnomedicinal properties. *Oriental Pharmacy and Experimental Medicine*, 17, 189-201. <https://doi.org/10.1007/s13596-017-0263-0>
- Janiszewska, D. y Ossowska, L. (2018). Diversification of European Union Member States due to the production of renewable energy from agriculture and forestry. *Problems of World Agriculture*, 18(33), 95–104. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.275528>
- Janiszewska, D. y Ossowska, L. (2020). Biomass as the Most Popular Renewable Energy Source in EU. *European Research Studies Journal*, 23(3), 315–326

- Janiszewska, D. y Ossowska, L. (2022). The role of agricultural biomass as a renewable energy source in European Union countries. *Energies*, 15(18), 6756. <https://doi.org/10.3390/en15186756>
- Jenkins, B. M., Baxter, L. L. y Koppejan, J. (2019). Biomass combustion. *Thermochemical processing of biomass: conversion into fuels, chemicals and power*, 49-83. <https://doi.org/10.1002/9781119417637.ch3>
- Ji, Y., Zhou, G., Li, Z., Wang, S., Zhou, H. y Song, X. (2020). Triggers of widespread dieback and mortality of poplar (*Populus* spp.) plantations across northern China. *Journal of Arid Environments*, 174, 104076. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104076>
- Jimeno, C. L. y González, C. M. (2022). Las materias primas minerales y la transición energética. *Cuadernos de estrategia*, 209, 61-174.
- Kawamata, S. (1977). Studies on determining the sugar composition of fruits by gas-liquid chromatography. *Bulletin of the Tokyo to Agricultural Experimental Station*, 10, 53-67.
- Keown, D. M., Favas, G., Hayashi, J. I. y Li, C. Z. (2005). Volatilisation of alkali and alkaline earth metallic species during the pyrolysis of biomass: differences between sugar cane bagasse and cane trash. *Bioresource Technology*, 96, 1570–1577. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.12.014>
- Khan, M. T., Seema, N., Khan, I. A. y Yasmine, S. (2017). Applications and potential of sugarcane as an energy crop. *Agricultural Research Updates*, 16, 1-24.
- Knápek, J., Králík, T., Vávrová, K. y Weger, J. (2020). Dynamic biomass potential from agricultural land. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110319. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110319>
- Krishan, O. y Suhag, S. (2019). An updated review of energy storage systems: Classification and applications in distributed generation power systems incorporating renewable energy resources. *International Journal of Energy Research*, 43(12), 6171-6210. <https://doi.org/10.1002/er.4285>
- Kuljanabhadgavad, T. y Wink, M. (2009). Biological activities and chemistry of saponins from *Chenopodium quinoa* Willd. *Phytochemistry Reviews*, 8, 473–490. <https://doi.org/10.1007/s11101-009-9121-0>
- Larnaudie, V., Ferrari, M. D. y Lareo, C. (2022). Switchgrass as an alternative biomass for ethanol production in a biorefinery: Perspectives on technology, economics and environmental sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112115. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112115>
- Lassi, U. L. H. (2013). *Biomass to energy and chemicals*. Kokkola University Consortium Chydenius.
- Lee, D. K., Aberle, E., Anderson, E. K., Anderson, W., Baldwin, B. S., Baltensperger, D., Barrett, M., Blumenthal, J., Bonos, S., Bouton, J., Bransby, D. I., Brummer, C., Burks, P. S., Chen, C., Daly, C., Egenolf, J., Farris, R. L., Fike, J. H., Gaussoin, R. ... Owens, V. (2018). Biomass production of herbaceous energy crops in the United States: Field trial results and yield potential maps from the multiyear regional feedstock partnership. *GCB Bioenergy*, 10(10), 698-716. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12493>
- León, J. (2000). *Botánica de los cultivos tropicales*. Editorial Agroamérica, Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura.
- Levenda, A. M., Behrsin, I. y Disano, F. (2021). ¿Energías renovables para quién? Una revisión sistemática global de las implicaciones de justicia ambiental de las tecnologías de energía renovable. *Investigación energética y ciencias sociales*, 71, 101837.
- Li, G. y Zhu, F. (2018). Quinoa starch: structure properties and applications. *Carbohydrate Polymers*, 181, 851-861. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.11.067>
- Liang, C., Zhang, J., Fu, G., Jin, Z., Lu, Q., Li, X. y Yue, D. (2022). Effect of Bonding on the Structure and Properties of Nanocellulose Films. *BioResources*, 17(4): 6761-6774. <https://doi.org/10.15376/biores.17.4.6761-6774>
- Lizana, L. A. y Reginato G. (1990). Cherimoya. En S. Nagy, P. E. Shaw y W. F. Wardowski (Eds.), *Tropical and subtropical fruits: Composition, properties and uses* (pp. 131–148). AVI Publishing Co, Inc.

- Loizzo, M. R., Tundis, R., Bonesi, M., Menichini, Fe., Mastellone, V., Avallone, L. y Menichini, Fr. (2012). Radical scavenging, antioxidant and metal chelating activities of *Annona cherimola* Mill. (cherimoya) peel and pulp in relation to their total phenolic and total flavonoid contents. *Journal of Food Composition and Analysis*, 25(2), 179-184.
- Lopez-Bellido, L., Wery, J. y López-Bellido, R. J. (2014). Energy crops: prospects in the context of sustainable agriculture. *European Journal of Agronomy*, 60, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.07.001>
- Lys, S., Yurasova, O. y Vashkurak, Y. (2021). Influence of humidity of wood fuel on the gasification process in a continuous layer. In Proceedings of EcoComfort 2020 (pp. 268-276). Springer International Publishing.
- Mamman, A. y Lee, J. (2008). Furfural: Hemicellulose/xylose derived biochemical. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2(5), 438-454. <https://doi.org/10.1002/bbb.95>
- Manica, I. (1997). Taxionomia morfologia and anatomia. En A. R. Sao Jose, I. V. B. Souza, O. M. Morais y T. N. H. Reboucas (Eds.), *Proceedings of I Brazilian Symposium on Annonaceous* (pp. 20-35). Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.
- Mannino, G., Gentile, C., Porcu, A., Agliassa, C., Caradonna, F. y Bertea, C. M. (2020). Chemical profile and biological activity of cherimoya (*Annona cherimola* Mill.) and atemoya (*Annona atemoya*) leaves. *Molecules*, 25(11), 2612. <https://doi.org/10.3390/molecules25112612>
- Marron, N., Gielen, B., Brignolas, F., Gao, J., Johnson, J. D., Karnosky, D. F., Polle, A., Scarascia-Mugnozza, G., Schroeder, W. R. y Ceulemans, R. (2014). *Abiotic stresses. Poplars and Willows: Trees for Society and the Environment*. FAO-CABI, 337-454.
- Martínez-Solís, J., Calzada, F., Barbosa, E. y Valdés, M. (2021). Antihyperglycemic and Antilipidemic Properties of a Tea Infusion of the Leaves from *Annona cherimola* Miller on Streptozocin-Induced Type 2 Diabetic Mice. *Molecules*, 26(9), 2408. <https://doi.org/10.3390/molecules26092408>
- Matías, J., Cruz, V. y Raguera, M. (2021). Heat Stress Impact on Yield and Composition of Quinoa Straw under Mediterranean Field Conditions. *Plants*, 10(5), 955. <https://doi.org/10.3390/plants10050955>
- Menezes E. G. T., Oliveira, E. R., Carvalho, G. R., Guimaraes, I. C. y Queiroz, F. (2019). Assessment of chemical, nutritional and bioactive properties of *Annona crassiflora* and *Annona muricata* wastes. *Food Science and Technology*, 39, 662-672. <https://doi.org/10.1590/fst.22918>
- Merzic, A., Turkovic, N., Ikanovic, N., Lapandic, E., Kazagic, A. y Music, M. (2022). Towards just transition of coal regions-Cultivation of short rotation copies and dedicated energy crops for biomass co-firing vs photo voltaic power plants. *Energy Conversion and Management: X*, 15, 100267. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100267>
- Mills, M. P. (2019). *The "new energy economy": An exercise in magical thinking*. The Manhattan Institute.
- Mitchel, R. B., Schmer, M. R. Anderson, W. F., Jin, V., Balkcom, K. S., Kiniry, J., Coffin, A. y White, P. (2016). Dedicated Energy Crops and Crop Residues for Bioenergy Feedstocks in the Central and Eastern USA. *BioEnergy Research*, 9, 384-398. <https://doi.org/10.1007/s12155-016-9734-2>
- Mohammed, M. A., Hamed, M. A., El-Gengaihi, S. E., Enein, A. M. A., Ahmed, O. K. y Hassan, E. M. (2020). In vitro screening of *Annona cherimola* leaves and barks for their antioxidant activity and in vivo assessment as protective agents against gastric ulcer in rats. *Plant Archives*, 20(1), 2658-2668.
- Mohanty, S. K. y Swain, M. R. (2019). *Bioethanol production from corn and wheat: food, fuel, and future*. In Bioethanol production from food crops (pp. 45-59). Academic Press.
- Mongil-Manso, J. (2018). *Operaciones básicas en tratamientos selvícolas*. Paraninfo.
- Montes, T., Cabrera, I. y Pérez, M. (2020). Efectos de las saponinas sobre la fermentación rumial in vivo y el rendimiento de los animales. *Archivos Latino Americanos de Nutrición*, 70(3), 493-505.
- Morillo-Coronado, A. C., Manjarres-Hernández, E. H., Morillo-Coronado, Y. y González-Mendoza, L. (2021). *Una mirada al cultivo de la quinoa en el departamento de Boyacá*. Editorial UPTC.

- Moreno, J. C. (1987). Polinización artificial del chirimoyo (*Annona cherimola* Mill.), comparación de técnicas de conservación y aplicación del polen, acción de los insectos y test de variabilidad [Tesis de maestría, Universidad de Sevilla].
- Morton, J. F. (1987). *Fruits of warm climates*. Creative Resource Systems.
- Murillo, S. E. P. y Nevarez, E. M. Z. (2021). *Biocombustibles aprovechamiento de la biomasa*. Savez.
- Muscat, A., de Olde, E. M., Kovacic, Z., de Boer, I. J. M. y Ripoll-Bosch, R. (2021). Food, energy or biomaterials? Policy coherence across agro-food and bioeconomy policy domains in the EU. *Environmental Science and Policy*, 123, 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.05.001>
- Næss, J. S., Hu, X., Gvein, M. H., Iordan, C. M., Cavalett, O., Dorber, M., Giroux, B. y Cherubini, F. (2023). Climate change mitigation potentials of biofuels produced from perennial crops and natural regrowth on abandoned and degraded cropland in Nordic countries. *Journal of Environmental Management*, 325(A), 116474. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116474>
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., De Vries, B., Fenham, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T. Y., Kram, T., Rovere, E. L., Michaelis, L., Moris, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A. ... Zhou, D. (2000). *Special Report on Emissions Scenarios*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK.
- Naranjo, C. S. (2020). *Centrales termoeléctricas*. Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED).
- Navarro, G. y Navarro, S. (2014). *Fertilizantes, química y acción*. Paraninfo.
- Navarro-Perez, D., Radcliffe, J., Tierney, A. y Jois, M. (2017). Quinoa seed lowers serum triglycerides in overweight and obese subjects: a dose-response randomized controlled trial. *Current Developments in Nutrition*, 1(9), e001321. <https://doi.org/10.3945/cdn.117.001321>
- Niemczyk, M. (2021). The effects of cultivar and rotation length (5 vs. 10 years) on biomass production and sustainability of poplar (*Populus* spp.) bioenergy plantation. *GCB Bioenergía*, 13 (6), 999-1014. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12827>
- Nipattummakul, N., Ahmed, I., Kerdsuwan, S. y Gupta, A. (2010). Hydrogen and syngas production from sewage sludge via steam gasification. *International Journal of Hydrogen Energy* 35(21), 11738-11745. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.032>
- Nogués, F. S., García-Galindo, D. y Rezeau, A. (2010). *Energía de la biomasa. Vol. I*. Prensas de la Universidad de Zaragoza.
- Nowak, V., Du, J. y Charrondière, U. R. (2016). Assessment of the nutritional composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Chemistry*, 193, 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.02.111>
- Nugraha, A. S., Damayanti, Y. D., Wangchuk, P. y Keller, P. A. (2019). Anti-Infective and Anti-Cancer Properties of the Annona Species: Their Ethnomedicinal Uses, Alkaloid Diversity, and Pharmacological Activities. *Molecules*, 24(23), 4419. <https://doi.org/10.3390/molecules24234419>
- Odavić, P., Milić, D., Zekić, V. y Tica, N. (2017). Potential of agricultural biomass: Comparative review of selected EU regions and region of Vojvodina. *Contemporary Agriculture*, 66(1-2), 62-67. <https://doi.org/10.1515/contagri-2017-0011>
- Ojeda, A., Baldini, A. y Becchi, F. (2013). *Programa de arborización: Un chileno, un árbol. Vol. I*. Corporación Nacional Forestal, Gerencia Forestal, Departamento de Arborización de Santiago de Chile.
- Olesen, T. y Muldoon, S. J. (2009). Branch development in custard apple (cherimoya *Annona cherimola* Miller × sugar apple *A. squamosa* L.) in relation to tip-pruning and flowering, including effects on production. *Trees*, 23(4), 855-862. <https://doi.org/10.1007/s00468-009-0327-y>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2019). *Informe sobre la factibilidad del aprovechamiento de la biomasa forestal de campo*. Colección Informes Técnicos N° 7.
- Pagano, M., Hernando, H., Cueto, J., Cruz, P. L., Dufour, J., Moreno, I. y Serrano, D. P. (2023). Insights on the acetic acid pretreatment of wheat straw: changes induced in the biomass properties and benefits for the bio-oil production by pyrolysis. *Chemical Engineering Journal*, 454, 140206. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140206>

- Pandey, V. C., Bajpai, O. y Singh, N. (2016). Energy crops in sustainable phytoremediation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 58-73. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.078>
- Paniagua, S., Escudero, L., Escapa, C., Coimbra, R. N., Otero, M. y Calvo, L. F. (2016). Effect of waste organic amendments on *Populus* sp. biomass production and thermal characteristics. *Renewable Energy*, 94, 166-174. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.019>
- Patiño-Olivares, A. (2000). *Introducción a la Ingeniería química: balances de masa y energía, tomo II*. Universidad Iberoamericana.
- Pedroli, B., Elbersen, B., Frederiksen, P., Grandin, U., Heikkilä, R., Henning, P., Izakovicová, Z., Johansen, A., Meiresonne, L. y Spijker, J. (2013). Is energy cropping in Europe compatible with biodiversity? Opportunities and threats to biodiversity from land-based production of biomass for bioenergy purposes. *Biomass Bioenergy*, 55, 73-86. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.09.054>
- Pérez, J. F., Mermoud, F., Golfier, F., Salvador, S., Van de Steene, L. y Dirion, J.L. (2006). Experimental and numerical study of steam gasification of a single charcoal particle. *Combustion and flame*, 145, 59-79. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2005.12.004>
- Perrone, A., Yousefi, S., Salami, A., Papini, A. y Martinelli, F. (2022). Botanical, genetic, phytochemical and pharmaceutical aspects of *Annona cherimola* Mill. *Scientia Horticulturae*, 296, 110896. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.110896>
- Pires, J. R., Souza, V. G. y Fernando, A. L. (2019). Valorization of energy crops as a source for nanocellulose production—current knowledge and future prospects. *Industrial Crops and Products*, 140, 111642. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111642>
- Pivato, A., Garbo, F., Moretto, M. y Lavagnolo, M. C. (2018). Energy crops on landfills: functional, environmental, and costs analysis of different landfill configurations. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(36), 35936-35948. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1452-1>
- Pleguezuelo, C. R. R., Zuazo, V. H. D., Biielders, C., Bocanegra, J. A. J., Torres, F. P. y Martínez, J. R. F. (2015). Bioenergy farming using woody crops. A Review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 95-119. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0262-1>
- Popenoe, W. (1974). *Manual of tropical and subtropical fruits, excluding the banana, coconut, pineapple, citrus fruits, olive and fig*. CollierMacmillan Publishers
- Puah, C. y Choo, Y. (2008). *Palm biodiesel development and its social and environment impacts in Malaysia*. Policy dialogue on biofuels in Asia: benefits and challenges.
- Rahman, M. M., Mostafiz, S. B., Paatero, J. V. y Lahdelma, R. (2014). Extension of energy crops on surplus agricultural lands: A potentially viable option in developing countries while fossil fuel reserves are diminishing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 108-119. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.092>
- Rajesh Banu, J., Preethi, Kavitha, S., Tyagi, V. K., Gunasekaran, M., Karthikeyan, O. P. y Kumar, G. (2021). Lignocellulosic biomass based Biorefinery: A successful platform towards circular bioeconomy. *Fuel*, 302, 121086. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121086>
- Razzaghi, F., Jacobsen, S. E., Jensen, C. R. y Andersen, M. N. (2015). Ionic and photosynthetic homeostasis in quinoa challenged by salinity and drought – Mechanisms of tolerance. *Functional Plant Biology*, 42(2), 136-142. <https://doi.org/10.1071/FP14132>
- Rice-Evans, C. A. y Packer, L. (1998). *Flavonoids in Health and Disease*. Marcel Dekker.
- Rincón, S., Mendoza, L. y Gómez, A. (2019). *Tratamiento térmico de biosólidos para aplicaciones energéticas – Pirólisis y conversión de sus alquitranes*. Kassel University Press.
- Rincón-Martínez, J. M. y Silva-Lora. (2015). *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad*. Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía.
- Rios, M. Y., Castrejon, F., Robledo, N., Leon, I., Rojas, G. y Navarro, V. (2003). Chemical composition and antimicrobial activity of the essential oils from *Annona cherimola* (Annonaceae). *Revista de la Sociedad Química de México*, 47(2), 139-142.

- Risi, J. y Galwey, N. W. (1989). The pattern of genetic diversity in the Andean grain crop quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). II Multivariate methods. *Euphytica*, 41, 135-145. <https://doi.org/10.1007/BF00022424>
- Rizzolo, J. A., Woiciechowski, A. L., Júnior, A. I. M., Zevallos L. A. y Soccol, C. R. (2021). The potential of sweet potato biorefinery and development of alternative uses. *SN Applied Sciences*, 3, 347. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04369-y>
- Romaní-Morón, M. J. y Váldez-Arana, J. del C. (2019). Efecto del cambio de hábitat en las características nutricionales y funcionales de 16 accesiones de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivadas en las Costa Peruana. *Scientia Agropecuaria*, 10(2), 293-302. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.02.15>
- Rozzi, E., Minuto, F. D., Lanzini, A. y Leone, P. (2020). Green synthetic fuels: Renewable routes for the conversion of non-fossil feedstocks into gaseous fuels and their end uses. *Energies*, 13(2), 420. <https://doi.org/10.3390/en13020420>
- Rueda, J., García-Caballero, J. L., Cuevas, Y., García-Jiménez, C. y Villar, C. (2017). *Cultivo de chopos en Castilla y León*. Consejería de Fomento y Medio Ambiente, Junta de Castilla y León.
- Ruiz, E. y Sánchez, J. M. (2014). Purificación y acondicionamiento del gas de gasificación de biomasa. *Boletín del Grupo Español del Carbón*, 33, 15-19.
- Safford, W. E. (1917). *Food-Plants and textiles of ancient America*. Proceedings of the Nineteenth International Congress of Americanists, Washington.
- Sakulkit, P., Palamanit, A., Dejchanchaiwong, R. y Reubroycharoen, P. (2020). Characteristics of pyrolysis products from pyrolysis and co-pyrolysis of rubber wood and oil palm trunk biomass for biofuel and value-added applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(6), 104561. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104561>
- Salazar, J. P., Hernández, M. D. S. y Yepes, C. A. P. (2021). Diseño de un reactor de tornillos para la obtención de bioaceite a partir de pirólisis rápida de biomasa residual. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 9(2), 26-41. <https://doi.org/10.17081/invinno.9.2.4209>
- Salvador, A. R. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 104(2), 331-345.
- Sanewski, G. M. (1988). *Growing Custard Apples*. Queensland Department of Primary Industries.
- Scarlat, N., Martinov, M. y Dallemand, J. F. (2010). Assessment of the availability of agricultural crop residues in the European Union: Potential and limitations for bioenergy use. *Waste Management*, 30(10), 1889-1897. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.016>
- Searle, S. y Malins, C. (2013). *Availability of Cellulosic Residues and Wastes in the EU*. The International Council on Clean Transportation.
- Schroeder, C. A. (1943). Hand pollination studies on the cherimoya. *Proceedings American Society for Horticultural Science*, 43, 39-41.
- Sherwood, J. (2020). The significance of biomass in a circular economy. *Bioresource Technology*, 300, 122755. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122755>
- Sierra, I., Pérez, D., Gómez, S. y Morante, S. 2010. *Análisis instrumental*. Gesbiblo SL.
- Singh, V. y Das, D. (2019). Chapter 3: Potential of hydrogen production from biomass. *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies*, 123-164. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814251-6.00003-4>
- Sjöström, E. (1993). *Wood Chemistry: fundamentals and Applications*. Academic Press.
- Smil, V. (2021). *Energía y Civilización – Una Historia*. Arpa.
- Srivastava, R. K., Shetti, N. P., Reddy, K. R., Kwon, E. E., Nadagouda, M. N. y Aminabhavi, T. M. (2021). Biomass utilization and production of biofuels from carbon neutral materials. *Environmental Pollution*, 276, 116731. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116731>
- Stikic, R., Glamoclija, D., Demin, M., Vucelic-Radovic, B., Jovanovic, Z. y Milojkovic-Opsenica, D. (2012). Agronomical and nutritional evaluation of quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* Willd.) as

- an ingredient in bread formulations. *Journal of Cereal Science*, 55(2), 132-138. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.10.010>
- Tang, Y., Li, X., Zhang, B., Chen, P. X., Liu, R. y Tsao, R. (2015). Characterization of phenolics, betanins and antioxidant activities in seeds of three *Chenopodium quinoa* Willd. genotypes. *Food Chemistry*, 166, 380-388. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.06.018>
- Tapia, M. (1982). *The Environment, Crops and Agricultural Systems in the Andes and Southern Peru*. Instituto Interamericano de la Cooperación para la Agricultura.
- Tapia, M., Gandarillas, H., Alandia, S., Cardoso, A. y Mujica, A. (1979). Genética y origen de la quinua. Instituto Interamericano de la Cooperación para la Agricultura.
- Tenchea, A. I., Tokar, D. M. y Foris, D. (2019). The use of biomass as a renewable energy source in a fluidized bed combustion plant. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Forestry - Wood Industry - Agricultural Food Engineering*, 12(61), 117-126. <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2019.12.61.2.10>
- Tíscar-Oliver, P. A. (2021). *Botánica Agronómica*. Paraninfo.
- Tripathi, N., Hills, C. D., Singh, R. S. y Atkinson, C. J. (2019). Biomass waste utilisation in low-carbon products: Harnessing a major potential resource. *Climate and Atmospheric Science*, 2, 35. <https://doi.org/10.1038/s41612-019-0093-5>
- Vaish, S., Kaur, G., Sharma, N. K. y Gakkhar, N. (2022). Estimation for Potential of Agricultural Biomass Sources as Projections of Bio-Briquettes in Indian Context. *Sustainability*, 14(9), 5077. <https://doi.org/10.3390/su14095077>
- Vanbeveren, S. P. y Ceulemans, R. (2018). Genotypic differences in biomass production during three rotations of short-rotation coppice. *Biomass and Bioenergy*, 119, 198-205. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.09.027>
- Vargas, L., Haas, J., Reyes, L., Salinas, F. y Morata, D. (2020). *Generación de Energía Eléctrica con Fuentes Renovables*. Universidad de Santiago de Chile.
- Vassari, M., Barletta, E., Vinci, S., Ramazzotti, M., Francesconi, A., Manetti, F. y Degl'Innocenti, D. (2020). *Annona cherimola* miller fruit as a promising candidate against diabetic complications: an in vitro study and preliminary clinical results. *Foods*, 9(10), 1350. <https://doi.org/10.3390/foods9101350>
- Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Uribe, E., Puente, L. y Martínez, E. A. (2010). Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), an ancient Andean grain: a review. *Journal of Sciences of Food and Agriculture*, 90, 2541-2547. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4158>
- Velázquez-Martí, B. (2018). *Aprovechamiento de la biomasa para uso energético*. Reverté.
- Viccaro, M., Caniani, D., Masi, S., Romano, S. y Cozzi, M. (2022). Biofuels or not biofuels? The “Nexus Thinking” in land suitability analysis for energy crops. *Renewable Energy*, 187, 1050-1064. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.008>
- Wahli, C. 1990. *Quinua: hacia su cultivo comercial*. LatinReco SA
- Wang, M., Leitch, M. y Xu, C. (2009). Synthesis of phenol-formaldehyde resol resins using organosolv pine lignins. *European Polymer Journal*, 4, 3380-3388. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2009.10.003>
- Wélé, A., Zhang, Y., Brouard, J.P., Pousset, J.L. y Bodo, B. (2005). Two cyclopeptides from the seeds of *Annona cherimola*. *Phytochemistry*, 66(19), 2376-2380. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2005.06.011>
- Wester, P. J. (1910). Pollination experiments with Anonas. *Bulletin of the Torrey Botanic Club* 37(11), 529. <https://doi.org/10.2307/2479045>
- Xi, B., Clothier, B., Coleman, M., Duan, J., Hu, W., Li, D., Di, N., Liu, Y., Fu, J., Li, J., Jia, L. y Fernández, J. E. (2021). Irrigation management in poplar (*Populus* spp.) plantations: A review. *Forest Ecology and Management*, 494, 119330. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119330>
- Xie, W., Ren, Y., Jiang, F., Liang, J. y Du, S. (2019). Pretreatment of quinoa straw with 1-butyl-3-methylimidazolium chloride and physicochemical characterization of biomass. *Renewable Energy*, 146, 1364-1371. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.072>

- Yahira, E. M. (2017). *Fruit and Vegetable Phytochemicals: Chemistry and Human Health* (2 volumes). Wiley BlackWell.
- Youdim, K. A., Shukitt-Hale, B. y Joseph, J. A. (2004). Flavonoids and the brain: interactions at the blood-brain barrier and their physiological effects on the central nervous system. *Free Radical Biology and Medicine*, 37(11), 1683-1693. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2004.08.002>

- Capítulo 3. Objetivos -

- Objetivos -

El vigente estado geopolítico mundial ha dejado patente que la actual dependencia del sistema energético con los combustibles fósiles es insegura y económicamente perjudicial. Sin embargo, a pesar de los grandes avances registrados en las últimas décadas en el campo de las energías renovables, la cantidad de energía producida por estas fuentes alternativas aún no es suficiente para satisfacer la creciente demanda de energía.

El potencial energético de la biomasa procedente de cultivos energéticos forestales, como es el caso de *Populus* sp., así como de cultivos en expansión, quinoa y chirimoya, pone de manifiesto la necesidad de explorar e incrementar la inversión de recursos respecto a este tema.

Por tanto, el **objetivo principal** de esta Tesis es estudiar y comparar el comportamiento térmico para la valorización energética de biomasa lignocelulósica originaria de un cultivo energético de *Populus* sp. con el de residuos procedentes de cultivos de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) y chirimoya (*Annona cherimola* Milld.).

Con el fin de ampliar la información conseguida y asegurar la consecución del objetivo principal se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar y comparar las propiedades combustibles de las distintas fuentes biomásicas respecto al proceso termoquímico aplicado: clones de chopo, cascarilla y tallo de quinoa y residuos de poda y semillas de un cultivo de chirimoya.
- Analizar las propiedades combustibles de las biomásas en función del tipo de fertilización aplicado.
- Identificar a partir de la elaboración y estudio de perfiles termogravimétricos las fases de pérdida de peso asociadas a cada tipo de biomasa y a cada proceso térmico, así como el rango de temperaturas en el que se producen.
- Analizar los parámetros cinéticos vinculados a las muestras implicadas en cada proceso térmico.

- Capítulo 4. Materiales Y Métodos -

- Materiales y Métodos -

En este apartado tan solo se van a enumerar los materiales y procedimientos más importantes llevados a cabo para alcanzar el objetivo principal y cada uno de los objetivos específicos citados en el **Capítulo 3** de esta tesis. La especificación detallada de material y métodos puede apreciarse detalladamente en el apartado así titulado de las distintas publicaciones (**Capítulos 5, 6 y 7**) que forman parte de esta tesis.

Cultivo Energético De *Populus* sp.

Materiales.

- Parcela de cultivo de 720 m² (45 m x 16 m) situada en la localidad de Hospital de Órbigo (42 27.183N, 05 53.650W).
- Aproximadamente 1440 ejemplares de chopo (*Populus* sp.) de cuatro años de edad y divididos en cuatro clones distintos: UNAL, I-214, AF-2 y AF-8.
- 2 fertilizantes orgánicos: un lodo de una estación de tratamiento de aguas residuales (BIOSOLIDS) y un lodo procedente de una industria láctea (MUD).
- Calibre digital Powerfix®.
- Láser de alta precisión Haglöf Vertex®v3 201 DME.
- Estufa Memmert® GmbH + Co. KG.
- Bomba calorimétrica Parr® 6300.
- Molino convencional Fritsch® P-19.
- Molino de bolas Retch® MM200.
- Instrumento simultáneo DTA-TGA TA Instruments® SDT2960.

Metodologías.

- Pretratamiento de la biomasa: se dejó secar la biomasa al aire durante aproximadamente 72 horas. Posteriormente se redujo su tamaño empleando en primer lugar un molino convencional y posteriormente el molino de bolas operando con 10 g de muestra a 30 rpm durante 4 minutos.
- Propiedades combustibles de la biomasa: las pruebas se realizaron en el laboratorio regional de combustibles (LARECOM) siguiendo normas estandarizadas para la determinación de la humedad (UNE-ISO 18134-1:2015),

el poder calorífico superior (ISO 18125:2017), el análisis elemental de carbono (UNE-EN ISO 16948:2015), azufre-cloro (UNE- EN ISO 16994:2015) e hidrógeno-nitrógeno (UNE-EN ISO 16948:2015) y el contenido en cenizas (ASTM D1102 – 84, 2013), y volátiles (ASTM E872 – 82, 2013).

- Termogravimetría: para trabajar con los perfiles termogravimétricos se usó el programa informático TA® Universal Analysis 2000 acompañado de una hoja de cálculo Excel.
- Análisis estadístico: llevado a cabo mediante el programa informático IBM SPSS® v24.
- Análisis del suelo y los fertilizantes: fue llevado a cabo por el laboratorio de técnicas instrumentales de la Universidad de León (LTI) siguiendo normas estandarizadas.

Residuos Agrícolas De *Chenopodium quinoa* Willd.

Materiales.

- Invernadero con temperatura y humedad controlada.
- Dos residuos de biomasa lignocelulósica tras la cosecha: las cáscaras que protegen las semillas y la parte aérea de las plantas.
- Sustrato convencional.
- El resto de los materiales utilizados son los mismos que para el estudio del cultivo energético de *Populus* sp. arriba enumeradas.

Metodologías.

- Las metodologías utilizadas son idénticas a las del procesado y análisis de las muestras del cultivo de *Populus* sp. exceptuando que en este estudio se determinaron los índices de combustión mediante hojas de cálculo Excel.

Residuos Agrícolas De *Annona cherimola* Mill.

Materiales.

- Dos parcelas de cultivo con distintas condiciones de crecimiento:

- M1: cuenta con una superficie de 0,25 ha de cultivo formado por 20 árboles de 19 años de edad ubicado en el municipio de Casarabonela (España).
- M2: con una extensión de 0,35 ha y compuesto de 45 árboles de 21 años de edad, ubicado en el municipio de Tolox (Málaga).
- Dos tipos de fertilización:
 - M1: fertilizada anualmente con 3 kg por árbol de fertilizante mineral (NPK 15-15-15).
 - M2: fertilizada anualmente con 25 kg por árbol de fertilizante orgánico formado por estiércol compostado de vaca.
- Los demás materiales empleados para los análisis son los mismos que los descritos para el cultivo energético de *Populus* sp.

Metodologías.

- Las metodologías llevadas a cabo son iguales a las explicadas para el cultivo de *Populus* sp. con la excepción de que en este caso se calcularon determinados parámetros cinéticos mediante métodos isoconversionales a partir de hojas de cálculo Excel.

- Capítulo 5. Primera Publicación -

- Bioenergy derived from an organically fertilized poplar plot: overall TGA and index estimation study for combustion, gasification, and pyrolysis processes -

Energy derived from biomass is, nowadays, one of the most attractive options to mitigate fossil fuel use. In this study, an organically fertilized poplar plot was employed. The goals of this work were, in the first place, to analyze the thermal behavior of the samples considering three thermal processes: combustion, gasification, and pyrolysis to, finally, try to determine the influence of the poplar clone and the subscriber type about this parameter. For these purposes, thermogravimetric analysis (TGA) together with kinetic parameters and thermal indexes was used. In the same way, fuel properties were determined. Hence, having average higher heating value around 20 MJ/kg and other accurate properties, poplar samples were considered as a fuel with optimal properties. TGA profiles were different for the thermal processes compared. Four different emission stages appeared for both combustion and gasification (moisture, hemicellulose, cellulose, and lignin). However, pyrolysis profiles showed a different pattern. Thermal index results were higher for the combustion than for the rest of the processes.

<https://doi.org/10.1007/s13399-019-00392-7>

- Capítulo 6. Segunda Publicación -

- Study of quinoa plant residues as a way to produce energy through thermogravimetric analysis and indexes estimation -

Quinoa is a pseudo-cereal employed to provide nutrition and sustenance for a long time. Currently, the consumption of seeds of this plant is increasing. The seed are the only nutritionally part, which implies that both the husks like the rest of biomass represent a residue vaguely studied. Authors had studied the thermal behavior of these quinoa inedible parts. Fuel properties, biomass composition and DTG profiles were done for an oxidative atmosphere under different heating rates in the same way that several characteristic combustion indexes were estimated. Also, DTG profiles for a non-oxidative environment together with the characterization of the char obtained were showed. Results denoted that quinoa biomass presented a more suitable nature for combustion process compared with the husks. Furthermore, combustion DTG profiles showed two different stages: devolatilization and ignition. The maximum combustion weight loss value (20.63%/min) was achieved for biomass under a 40 K/min rate. DTG profiles under inert atmosphere evidenced two weight loss stages clearly influenced by the cellulose and lignin content. Once again, biomass was the one with the better behavior instead of the husk for this pyrolysis process. Biomass which had good values in terms of yield (26.02%) and heating value (15.41 MJ/kg).

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.056>

- Capítulo 7. Tercera Publicación -

- Custard apple crop residues combustion: an overall study of their energy behaviour under different fertilisation conditions -

The current energy demand requires new energy sources. The use of biomass is an attractive option. In this work, the combustion thermal behaviour and kinetic of custard apple (*Annona cherimola*) crop remains derived from different plot fertilisation conditions (organic and inorganic) were studied. Thermogravimetry procedures were applied to seeds and wood under four heating rates (5, 10, 20 and 40 °C/min). Iso-conversional methods (Friedman, Flynn–Wall–Ozawa and Kissinger–Akahira–Sunose) were used to determine the activation energy and the frequency factor. Fuel results showed a higher high heating value for seeds (~ 24.78 MJ/mol) when compared with wood (~ 19.33 MJ/mol). Thermogravimetric profiles denoted that, while seed samples were only affected by heating ramps, pruning remains were also influenced by the type of fertiliser. Organic fertiliser was responsible for higher maximum values on the second decomposition peak for Wood samples, at 20 and 40 °C/min (56.78%/min and 23.03%/min). Kinetic indexes were also notably influenced by the fertiliser nature. Organic manure reduced the average activation energy results, being more perceptible in seeds (135.51–172.32 kJ/ mol) than wood (140.32–144.43 kJ/mol). Hence, it is proven that the type of fertilisation affects the thermal behaviour of custard apple residues.

<https://doi.org/10.1007/s13399-022-03046-3>

- Capítulo 8. Resultados y Discusión -

- Resultados y Discusión -

Análogamente a lo referido en el apartado de Materiales y Métodos (**Capítulo 4**), en este apartado se recogerá un resumen de los principales resultados alcanzados a lo largo de los tres estudios desarrollados en esta tesis. La información completa, extendida y justificada puede leerse en los subapartados de Resultados y Discusión de cada artículo publicado y recogido en los **Capítulos 5, 6 y 7** de esta memoria.

Cultivo Energético De *Populus sp*

Propiedades edáficas y datos lignocelulósicos

Los resultados edáficos pusieron de manifiesto que la aplicación de fertilizantes orgánicos (especialmente BIOSOLIDS) acarreó un incremento de nitratos en el suelo. A excepción de este hecho, el análisis global de los resultados no mostró grandes diferencias en lo referente a las propiedades edáficas.

Relativo al crecimiento agronómico en altura y diámetro de los ejemplares, la altura promedio de los árboles fertilizados fue mayor que la de los árboles control. La tasa de crecimiento en altura no fue constante durante los cuatro años y aunque no se encontraron diferencias significativas entre los árboles CONTROL y BIOSOLIDS, el tratamiento MUD resultó en alturas medias de alrededor de 38 cm más altas. También se apreciaron diferencias en referencia al diámetro, donde el tratamiento MUD de nuevo estuvo ligado a mayores diámetros (en torno a 3 cm). Ambos resultados están en línea con los encontrados en estudios similares (Broecks et al., 2012; Lafleur et al., 2012; Lamerre et al., 2015). Este incremento fue más notable en los clones AF-2 y UNAL.

El volumen de madera promedio alcanzó valores entre 17 m³ y 33 m³ por hectárea, estando de nuevo en línea con los resultados obtenidos por otros autores (Swamy et al., 2006). En este caso, el clon AF-2 bajo fertilización orgánica fue el que mayor incremento sufrió respecto a este parámetro.

Propiedades del combustible.

Tanto el análisis elemental como el análisis inmediato aportaron resultados muy uniformes y en consonancia con los obtenidos para *Populus* sp. (Zadeh et al., 2021) y para otras fuentes de biomasa lignocelulósica (Gil et al., 2010; Carmona et al., 2015). Destacar en este punto el valor promedio de volátiles en torno al 80%, garantizando el proceso de gasificación. También reseñable fue el resultado de poder calorífico superior (HHV) que, aunque aún lejos de los valores correspondientes a los combustibles fósiles (Niu et al., 2017), alcanzó los 20 MJ/mol, dejando entrever ya su óptimo procesado por combustión y, ligeramente en menor medida, para una gasificación.

Resultados termogravimétricos.

El estudio e interpretación de los perfiles termogravimétricos (TGA) permitió identificar las fases de degradación de la materia, denotando diferencias entre los tres procesos térmicos. Cuatro diferentes etapas aparecieron para las combustiones y gasificaciones, mientras que tres para la pirólisis. A continuación, se enumeran brevemente cada una de estas etapas para los procesos térmicos indicados.

- Combustión: se identificaron tres etapas, relacionadas con la degradación térmica de los distintos componentes de la madera. (1) pérdida de humedad por evaporación del agua; (2) desvolatilización (230-330 °C); e (3) ignición del biochar (365-485 °C).
- Pirólisis: se identificaron cuatro etapas, de nuevo estrechamente relacionadas con la liberación de los componentes de la biomasa (Randriamanantena et al., 2009). (1) deshidratación (100 °C); (2) pirólisis activa (220-340 °C); (3) pirólisis pasiva (490 °C); y (4) pirólisis de alto rango (625 °C).
- Gasificación: se pudieron identificar tres etapas. (1) secado (en torno a 25 °C). Formada por un solo pico asociado a la pérdida de humedad; (2) pirólisis (en torno a 230 °C). Constituida por dos picos, cada uno de ellos asociado a la liberación de un componente de la biomasa (hemicelulosa y celulosa); y (3) gasificación del biochar (425 °C), que se corresponde con la liberación de la lignina.

Parámetros cinéticos

Se determinaron la energía de activación (E_a) y el factor de frecuencia (A o k_0). Para entender los resultados hay que tener en cuenta que el primero está relacionado con la energía mínima necesaria para que se produzca una reacción química (Johll, 2008) y el segundo con la velocidad de colisión de sus moléculas, es decir, la velocidad a la que transcurre dicha reacción (Costa et al., 2004). Dado que se buscan reacciones que sucedan de forma rápida con el menor gasto energético posible, los valores deseados de estos parámetros serán bajos para E_a y altos para A .

El valor medio de E_a para la combustión fue el más bajo (170 kJ/mol), respecto a los otros dos procesos térmicos, y globalmente presentaron uniformidad, por lo que no se pudo seleccionar un clon/tratamiento más adecuado para este tratamiento.

Resultados similares se obtuvieron para la gasificación (valor medio 186,47 kJ/mol), estableciéndose la combinación BIOSOLIDS-AF8 como la que obtuvo los mejores resultados. Los valores de A son también similares en ambos procesos.

Por su parte, la energía de activación media requerida en la pirólisis fue notablemente mayor (330,50 kJ/mol, sin tener en cuenta la fase de alto rango), aunque fueron las reacciones de este proceso las que transcurrieron a mayor velocidad. Además, igual que en la gasificación, el fertilizante BIOSOLIDS aportó mejores resultados.

Índices térmicos

Permiten comparar rápidamente los resultados obtenidos entre los distintos procesos térmicos y con los trabajos de otros autores.

Los resultados del índice característico, S , aumentaron siguiendo el orden combustión > gasificación > pirólisis, siendo siempre superiores a 2×10^{-7} , lo que determina que la biomasa de *Populus* sp. posee un buen rendimiento térmico general, sobre todo para combustión y gasificación, y mejor que la biomasa herbácea (Wang et al., 2009). Los datos de pirólisis fueron menores, por lo que su comportamiento cinético se entiende como menos favorable para el caso de *Populus* sp.

De forma general, la fertilización orgánica con BIOSOLIDS mostró los mejores resultados, y en particular el clon AF-8.

Residuos Agrícolas de *Chenopodium quinoa* Willd.

Propiedades del combustible

Comparando los análisis elementales e inmediatos de las partes no comestibles de la quinoa (cáscara y biomasa aérea) se apreció que la biomasa aérea presentó mejores propiedades combustibles. Debido al prácticamente inexistente desarrollo de estudios de quinoa con fines térmicos, es difícil comparar los resultados con publicaciones de la misma especie. Aun así, se puede constatar que los contenidos porcentuales de C, N, H y S estuvieron en sintonía con los resultados obtenidos a partir de otras fuentes de biomasa herbácea (Li et al., 2012; El-Sayed and Mosfata, 2014), aunque alejados de los obtenidos en el estudio inicial del cultivo energético forestal de *Populus* sp. En relación al contenido en cloro, que puede ser responsable de la formación de incrustaciones en caldera (lo que en inglés se conoce como *fouling*) (Aho and Ferrer, 2005), fue superior respecto a otras biomásas herbáceas (Van der Drift et al., 2001; Theis et al., 2006) lo que podría suponer un problema de operación en calderas de bajas capacidades sin mezclas con otros materiales con menor contenido en este elemento.

De nuevo, destacar en este punto el contenido en volátiles, que con un valor del 73% se aproxima más a resultados de biomasa lignocelulósica que herbácea y asegura el uso de este material en procesos de combustión.

De igual modo, el poder calorífico superior (HHV) fue mayor en la biomasa aérea (17,33 MJ/kg) que en la cáscara (16,29 MJ/kg), estando en línea con otras biomásas como la paja de trigo (Channiwala and Parikh, 2002) pero de nuevo alejado del valor obtenido con el chopo.

Resultados termogravimétricos

De forma análoga a la del estudio relacionado con el género *Populus*, los perfiles termogravimétricos (TGA) permitieron determinar las fases de degradación de estas muestras:

- Combustión: se identificaron dos etapas de degradación, aunque en función de la biomasa se encontraron diferencias.
 - Biomasa aérea: (1) desvolatilización (235 °C), representada por un único pico; y (2) combustión propiamente dicha por la interacción del biochar con los volátiles liberados en la fase anterior. Representada por dos picos, el primero a 400 °C y el segundo a 430 °C (sólo patente en la rampa de calentamiento más alta, 40 K/min).
 - Cáscara: (1) desvolatilización (200 °C), representada por dos picos; y (2) combustión representada por dos picos (380 °C y 400 °C).

En ambos casos, la primera etapa está relacionada con el desprendimiento de hemicelulosa y celulosa y la segunda con la liberación de la lignina. Estos datos siguen la misma tendencia que los obtenidos para biomasa herbácea (Bridgeman et al., 2008; Zhaosheng et al., 2009), pero difieren de los de biomasa leñosa como el chopo y del carbón (Wang et al., 2009).

- Pirólisis: se identificaron tres etapas, estrechamente relacionadas con el contenido de hemicelulosa, celulosa y lignina de las materias. (1) secado por evaporación de la humedad; (2) liberación de la celulosa y hemicelulosa; (3) liberación de la lignina (menos apreciable).

Los picos más elevados se alcanzan en la segunda fase, denotando que el contenido en celulosa es mayor. Sin embargo, la última etapa es menos apreciable debido al bajo contenido en lignina que ambas muestras presentan (levemente superior en cáscara). Debido a esto, estos resultados difieren notablemente respecto a los del chopo y otros árboles propiamente lignocelulósicos. También están alejados del carbón (Chen et al., 2018). Materiales combustibles, estos últimos, que presentan perfiles termogravimétricos diferentes a los de la quinoa en virtud a su diferente naturaleza.

En lo referente a las propiedades del biochar obtenido, la parte aérea presentó mejor rendimiento (26,02%) que la cáscara (22,36%). Resultados avalados por otros parámetros como mejor valor calorífico (15,41MJ/mol) y volátiles (24,94%).

Índices térmicos

Recurriendo a estos índices, estimados para el proceso térmico de combustión por su mayor representatividad e interés con fines energéticos, no se encontraron diferencias significativas para las distintas etapas de liberación considerando tanto las cáscaras como la biomasa aérea.

Los valores del índice característico, S , siempre fueron superiores a 2×10^{-7} , por lo que tuvieron buen rendimiento de combustión general, incluso mejor que el de otras fuentes herbáceas (Wang et al., 2009).

De forma global, los mejores resultados se alcanzaron con rampas de calentamiento altas (40 K/min). Sin embargo, y dependiendo de las necesidades finales del usuario, no puede ser descartado el uso de ese tipo de combustible en rampas de calentamiento bajas debido a la próxima homogeneidad de los resultados.

Residuos Agrícolas de *Annona cherimola* Mill.

Propiedades del combustible

Los análisis elementales e inmediatos mostraron diferencias en función del tipo de residuo de chirimoya estudiado. De forma global puede afirmarse que las semillas obtuvieron mejores resultados que los restos de poda. Destacando sobre todos los parámetros los datos de poder calorífico superior (HHV), las semillas presentaron valores muy altos (25 MJ/kg), más próximos a los combustibles pelletizados que a la biomasa natural sin procesar. Los valores de HHV de los restos de poda (19 MJ/mol) fueron semejantes a los de otras especies arbóreas (Paniagua et al., 2021; Kougioumtzis et al., 2021).

En ambos casos el alto contenido elemental de C y N revelaron buenas propiedades combustibles bajo combustión. Además, el contenido en S y Cl fue muy bajo, en línea con otros estudios similares (Kethobile et al., 2020; Mu et al., 2021). Estableciendo una comparativa con los datos de Cl para la quinoa (donde la cáscara contaba con 0.62% de cloro) en el caso de la madera de chirimoya bajo fertilización orgánica (se ha seleccionado esta combinación por ser la que mayor contenido en Cl presentó, 0.18%), puede apreciarse cómo las diferencias son

notables. Este hecho minimizaría considerablemente los problemas de *fouling* en calderas, así como una posible alternativa consistiría en la elaboración de materiales mixtos quinoa-madera de chirimoya.

Resultados termogravimétricos

Para los residuos de chirimoya se identificaron tres etapas: (1) Secado por evaporación de la humedad; (2) desvolatilización (250 – 450 °C), donde se liberan los componentes más sencillos; y (3) combustión del biochar (400 – 600 °C), donde se liberan los componentes más complejos.

Se observaron importantes diferencias según la biomasa utilizada, relacionadas con su composición. Mientras que los restos de poda están constituidos fundamentalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, las semillas cuentan, además, con un importante contenido en otros compuestos como aceites y alcoholes (Du et al., 2021), lo que variará los perfiles. Se resume a continuación el comportamiento de los perfiles para cada residuo estudiado de la plantación de chirimoya:

- Semillas: los picos máximos se alcanzan en la segunda etapa. No se apreciaron diferencias entre los distintos fertilizantes, aunque sí en función de las rampas de calentamiento. Para la combustión completa de sus componentes se necesitan temperaturas ligeramente más altas (550 – 600 °C).
- Residuos de poda (madera): además de la rampa de calentamiento, destaca la fuerte influencia que denota el tipo de fertilizante, alcanzando los valores máximos cuando se aplica fertilizante orgánico (muestra WC) bajo rápidas tasas de calentamiento (20 °C/min o 40 °C/min). La temperatura necesaria para la combustión completa es menor (500 °C) respecto a las semillas. La degradación térmica de estos residuos se asemeja a la combustión de ejemplares de chopo arriba descritos.

Parámetros cinéticos

Tras el cálculo de la energía de activación (E_a) y el factor de frecuencia (A o K_0) mediante métodos isoconversionales se encontraron diferencias entre los residuos de chirimoya evaluados. En lo referente a la energía de activación, las semillas presentaron un valor promedio levemente superior (132.09 – 175.30 kJ/mol) respecto al de restos de poda

(137.66 – 143.93 kJ/mol). Los resultados están en línea con otras biomásas similares estudiadas (Misse et al., 2018; Nyakuma et al., 2020) aunque alejados de los valores propios de los combustibles fósiles tradicionales (Saveliev et al., 2007; Zhao et al., 2019). El factor de frecuencia alcanzó cifras más altas en semillas que las de los restos de poda.

Lo más destacable en este punto fue la influencia del fertilizante aplicado ya que para todas las muestras, aunque en mayor medida en semillas, el abono orgánico disminuyó los valores de E_a y A .

Referencias bibliográficas

- Aho, M. y Ferrer, E. (2005). Importance of coal ash composition in protecting the boiler against chlorine deposition during combustion of chlorine-rich biomass. *Fuel*, 84(2-3), 201-212. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.08.022>
- Bridgeman, T. G., Jones, J. M., Shield, I. y Williams, P. T. (2008). Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties. *Fuel*, 87(6), 844-856. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.05.041>
- Broeckx, L.S., Verlinden, M.S. and Ceulemans, R. (2012). Establishment and two-year growth of a bio-energy plantation with fast-growing *Populus* trees in Flanders (Belgium): Effects of genotype and former land use. *Biomass and Bioenergy*, 42, 151-163. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.03.005>
- Carmona, R., Nuñez, T. y Alonso, M. F. (2015). Biomass yield and quality of an energy dedicated crop of poplar (*Populus* spp.) clones in the Mediterranean zone of Chile. *Biomass and Bioenergy*, 74, 96-102. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.01.004>
- Channiwala, S. A. y Parikh, P. P. (2002). A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. *Fuel*, 81(8), 1051-1063. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00131-4)
- Chen, X., Liu, L., Zhang, L., Zhao, Y., Zhang, Z., Xie, X., Qiu, P., Chen, G. y Pei, J. (2018). Thermogravimetric analysis and kinetics of the co-pyrolysis of coal blends with corn stalks. *Thermochimica Acta*, 659, 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.11.005>
- Costa, J., Cervera, S., Cunill, F., Esplungas, S., Mans, C. y Mata, J. (2004). *Curso de Ingeniería Química – Introducción a los procesos, las operaciones unitarias y los fenómenos de transporte*. Reverté.
- Du, J., Zhong, B., Subbiah, V., Barrow, C. J., Dunshea, F. R. y Suleria, H. A. (2021). Lc-esi-qtof-ms/ms profiling and antioxidant activity of phenolics from custard apple fruit and by-products. *Separations*, 8(5), 62. <https://doi.org/10.3390/separations8050062>
- El-Sayed, S. A. y Mostafa, M. E. (2014). Pyrolysis characteristics and kinetic parameters determination of biomass fuel powders by differential thermal gravimetric analysis (TGA/DTG). *Energy Conversion and Management*, 85, 165-172. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.068>
- Gil, M. V, Casal, D., Pevida, C., Pis, J. J. y Rubiera, F. (2010). Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion. *Bioresource Technology*, 101(14), 5601- 5608. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.008>
- Johll, M. E. (2008). *Química e investigación criminal*. Reverté.
- Kethobile, E., Ketlogetswe, C. y Gandure, J. (2020). Characterisation of the non-oil *Jatropha* biomass material for use as a source of solid fuel. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 10, 1251-1267. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00511-4>
- Kougioumtzis, M. A., Kanaveli, I. P., Karampinis, E., Grammelis, P. y Kakaras, E. (2021). Combustion of olive tree pruning pellets versus sunflower husk pellets at industrial boiler. Monitoring of emissions and combustion efficiency. *Renewable Energy*, 171, 516-525. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.118>
- Lafleur, B., Thiffault, E., Paré, D., Camiré, C., Bernier-Cardou, M. y Masse, S. (2012). Effects of hog manure application on the nutrition and growth of hybrid poplar (*Populus* spp.) and on soil solution chemistry in short-rotation woody crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 155, 95-104. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.04.002>
- Lamerre, J., Schwarz, K. U., Langhof, M., von Wühlisch, G. y Greef, J. M. (2015). Productivity of poplar short rotation coppice in an alley-cropping agroforestry system. *Agroforestry Systems*, 89(5), 933-942. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9825-7>

- Li, H., Liu, X., Legros, R., Bi, X. T., Lim, C. J. y Sokhansanj, S. (2012). Pelletization of torrefied sawdust and properties of torrefied pellets. *Applied Energy*, 93, 680-685. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.002>
- Misse, S. E., Brillard, A., Brillhac, J. F., Obonou, M., Ayina, L. M., Schönnenbeck, C. y Caillat, S. (2018). Thermogravimetric analyses and kinetic modeling of three Cameroonian biomass. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 132, 1979-1994. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7108-z>
- Mu, L., Wang, R., Zhai, Z., Zhang, B., Shang, Y. y Yin, H. (2021). Evaluation of thermokinetics methodology, parameters, and coke characterization of co-pyrolysis of bituminous coal with herbaceous and agricultural biomass. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01502-0>
- Niu, D. X., Song, Z. Y. y Xiao, X. L. (2017). Electric power substitution for coal in China: Status quo and SWOT analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 610-622. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.092>
- Nyakuma, B. B., Wong, S. L., Oladokun, O., Bello, A. A., Hambali, H. U., Abdullah, T. A. T. y Wong, K. Y. (2020). Review of the fuel properties, characterisation techniques, and pre-treatment technologies for oil palm empty fruit bunches. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 471-497.
- Paniagua, S., Reyes, S., Lima, F., Pilipenko, N. y Calvo, L. F. (2021). Combustion of avocado crop residues: Effect of crop variety and nature of nutrients. *Fuel*, 291, 119660. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119660>
- Randriamanantena, T., Razafindramisa, F. L., Ramanantsizehena, G., Bernes, A. y Lacabane, C. (2009). *Thermal behaviour of three woods of Madagascar by thermogravimetric analysis in inert atmosphere*. Proceedings of the Fourth High-Energy Physics International Conference.
- Saveliev, R., Chudnovsky, B., Kogan, B.Z., Korytnyi, E., Perelman, M., Sella, Y., Spitz, N. D. y Bar-Ziv, E. (2007). *Prediction of performance and pollutant emission from bituminous and sub-bituminous coals in utility boilers*. In ASME Power Conference.
- Swamy, S. L., Mishra, A. y Puri, S. (2006). Comparison of growth, biomass and nutrient distribution in five promising clones of *Populus deltoides* under an agrisilviculture system. *Bioresource Technology*, 97(1), 57-68. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.02.032>
- Theis, M., Skrifvars, B.J., Hupa, M. y Tran, H. (2006). Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels. Part 1: Deposition rates. *Fuel*, 85(7-8), 1125-1130. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.10.010>
- Van der Drift, A., Visser, H. J. M. y Olsen, A. (2001). *Prediction and solution methods for ash agglomeration and related problems during biomass conversion*. 11 European Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla.
- Wang, C., Wang, F., Yang, Q. y Liang, R. (2009). Thermogravimetric studies of the behavior of wheat straw with added coal during combustion. *Biomass and Bioenergy*, 33(1), 50-56. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.04.013>
- World Bioenergy Association, WBA. (2022). Global Bioenergy Statistics 2022.
- Zadeh, Z. E., Abdulkhani, A. y Saha, B. (2021). A comparative production and characterisation of fast pyrolysis bio-oil from *Populus* and *Spruce* woods. *Energy*, 214, 118930. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118930>
- Zhao, S., Pu, W., Sun, B., Gu, F. y Wang, L. (2019). Comparative evaluation on the thermal behaviors and kinetics of combustion of heavy crude oil and its SARA fractions. *Fuel*, 239, 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.014>
- Zhaosheng, Y., Xiaoqian, M. y Ao, L. (2009). Thermogravimetric analysis of rice and wheat straw catalytic combustion in air-and oxygen-enriched atmospheres. *Energy Conversion and Management*, 50(3), 561-566. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.10.022>

- Capítulo 9. Conclusiones -

- Conclusiones -

Tras el análisis de los resultados obtenidos a lo largo de cada uno de los estudios realizados se alcanzaron las siguientes conclusiones:

Cultivo Energético De *Populus* sp.

- Respecto a las propiedades del combustible, los valores de HHV en torno a 20 MJ/kg confirmaron que esta fuente biomásica puede considerarse una alternativa viable a los combustibles fósiles.
- La fertilización orgánica, y especialmente el tratamiento MUD, mejoro el crecimiento agronómico de los ejemplares de chopo (tanto en altura como en diámetro) respecto a las parcelas CONTROL.
- Los perfiles termogravimétricos (TGA) fueron muy similares entre los procesos de combustión y gasificación, diferenciándose en ambos casos tres etapas de degradación de la materia. Por el contrario, los resultados de la pirólisis revelaron cuatro fases de pérdida de peso.
- Los parámetros cinéticos, de mejor a menor comportamiento, mantuvieron el siguiente orden: lignina > celulosa > hemicelulosa. Tendencia corroborada a su vez por los datos de los índices térmicos.
- Valores del índice característico, S , siempre superiores a 2×10^{-7} reafirmaron el buen comportamiento térmico general de este tipo de biomasa lignocelulósica. Los valores numéricos fueron más altos en combustión, seguidos por gasificación y en última instancia los de pirólisis.
- Cada uno de los procesos termoquímicos (combustión, pirólisis y gasificación) reveló mejor comportamiento térmico para un tratamiento/clon diferente.

En virtud de todos los parámetros estudiados y descritos, se recomienda utilizar la biomasa de chopo para procesos de combustión en primer término, y de gasificación en segundo término.

Residuos Agrícolas De *Chenopodium quinoa* Willd.

- La biomasa aérea de la planta de quinoa presentó mejores propiedades combustibles que la cascarilla de las semillas. Entre otros, los resultados de HHV (17,33 MJ/kg) y el contenido en materia volátil (73,3%) refutaron esta tendencia.
- Los perfiles termogravimétricos (TGA) para combustión descubrieron dos etapas de pérdida de peso de la biomasa, con mayor importancia de la primera fase (desvolatilización) respecto a la segunda (ignición) en todas las muestras. Esto se relaciona con la composición de los residuos biomásicos.
- El valor máximo de pérdida de peso por combustión (20,63%/min) se alcanzó en muestras de biomasa aérea para rampas rápidas de calentamiento (40 K/min). Esto se reconfirmó por los resultados de los índices térmicos y el análisis estadístico.
- Los perfiles termogravimétricos para pirólisis mostraron tres etapas de pérdida de peso y estuvieron influenciados por la composición de las muestras de quinoa. Debido al mayor contenido en celulosa (38,70%) de las muestras de biomasa aérea, fue más importante la primera etapa de pérdida de peso; mientras que, en las muestra de cáscara, con mayor contenido en lignina (21,52%), resultó más importante la segunda fase de pérdida de peso.
- Relacionado con el biochar obtenido tras la pirólisis, en términos generales de rendimiento, el producido a partir de biomasa aérea presentó mejores resultados que el originado por las cáscaras.
- Los índices térmicos no presentaron diferencias significativas entre las muestras, aunque dado que los valores de S fueron mayores de 2×10^{-7} en todos los casos puede afirmarse que las biomásas estudiadas de quinoa presentan buen rendimiento térmico.

Por todo lo mencionado, la valorización energética de los residuos de quinoa (partes no comestibles) obtenidos tras la cosecha se considera una opción viable para el proceso térmico de combustión.

Residuos Agrícolas De *Annona cherimola* Mill.

- Con independencia del fertilizante aplicado, las semillas de chirimoya presentaron mejores propiedades combustibles que la madera obtenida de la poda de las plantaciones. Especialmente destacable su valor de HHV, próximo a 25 MJ/kg, que es más alto no solo respecto a los restos de biomasa, sino también comparado con la biomasa del cultivo energético de chopo y con los residuos de quinoa.
- Los perfiles TGA de las muestras de semilla estuvieron influenciados únicamente por las rampas de calentamiento, mientras que los correspondientes a los restos de poda mostraron una clara influencia por el fertilizante aplicado.
- Se necesitó una temperatura ligeramente superior para conseguir la combustión completa de las semillas (550-600 °C) en comparación con la madera de poda (500 °C)
- Los parámetros cinéticos revelaron una fuerte influencia del fertilizante utilizado. La aplicación de abono orgánico disminuyó notablemente la energía de activación en todas las muestras, y especialmente en las semillas.
- Los altos valores del factor de frecuencia hicieron ver que la descomposición térmica de los restos de chirimoya es un proceso complejo, que implica reacciones endotérmicas y exotérmicas.

De forma global, se confirma que los restos de chirimoya, tanto de las semillas como de los residuos procedentes de actividades de silvicultura, presentan características apropiadas para su valorización energética por combustión.

- Capítulo 10. Conclusions -

- Conclusions -

After analysing the results obtained throughout each of the studies carried out, the following conclusions were achieved:

Energy Crop Of *Populus* sp.

- Regarding the fuel properties, HHV values around 20 MJ/kg confirmed that this biomass source can be considered a viable alternative to fossil fuels.
- Organic fertilization, and especially the MUD treatment, improved the agronomic growth of the poplar specimens (both in height and in diameter) with respect to the CONTROL plots.
- Thermogravimetric profiles (TGA) were very similar between the combustion and gasification processes, differentiating in both cases three stages of matter degradation. In contrast, the pyrolysis results revealed four phases of weight loss.
- Kinetic parameters, from best to least behaviour. Maintained the following order: lignin > cellulose > hemicellulose. Trend corroborated in turn by the data of the thermal indexes.
- Characteristic index values, S , always higher than 2×10^{-7} reaffirmed the good thermal behaviour of this type of lignocellulosic biomass. The numerical values were highest in combustion, followed by gasification and lastly by pyrolysis.
- Each of the thermochemical processes (combustion, pyrolysis and gasification) revealed better thermal behavior for a different treatment/clone.

Given that all the parameters studied and described, it is recommended to use the poplar biomass for combustion processes in the first place, and for gasification in the second one.

Quinoa Farming Residues

- The aerial biomass of the quinoa plant presented better fuel properties than de seed husk. Among others, the results for HHV (17,33 MJ/kg) and the volatile matter content (73,3%) refuted this trend.
- Thermogravimetric profiles (TGA) for combustion revealed two stages of biomass weight loss, with greater importance in the first phase (devolatilization) compared to the second one (ignition) in all samples. This is related to the composition of biomass residues.
- The maximum value of weight loss by combustion (20,63 %/min) was achieved in aerial biomass samples for rapid heating ramps (40 K/min). This was confirmed by the results of the thermal indexes and the statistical analysis.
- Thermogravimetric profiles for pyrolysis showed three stages of weight loss and were influenced by the composition of the quinoa samples. Due to the higher cellulose content (38,70 %) in aerial biomass samples, the first stage of weight loss was more important. In husk samples, with a higher lignin content (21,52 %), the second phase of degradation was more important.
- Related to the biochar obtained after pyrolysis, in general terms of performance, the one produced from aerial biomass presented better results than the one originated from the husks.
- Thermal indexes did not present significant differences between the samples, although due to the S values were greater than 2×10^{-7} in all cases, it can be confirmed that the quinoa biomasses analysed have good thermal behaviour.

Because of this, the energy recovery of quinoa residues (inedible parts) obtained after harvest is considered a viable option for the thermal combustion process.

Custard Apple Farming Residues

- Regardless of the fertilizer applied, custard apple seed samples had better fuel properties than wood obtained from pruning remains. Its HHV value is especially noteworthy, close to 25 MJ/kg, which is higher not only respect to biomass remains, but also compared to the biomass of poplar energy crops and quinoa residues.
- TGA profiles of the seed samples were influenced only by the heating ramps but those corresponding to the pruning remains showed a clear influence by the fertilizer applied.
- A slightly higher temperature was needed to achieve a complete combustion of the seeds (550 – 600 °C) compared to pruning wood (500 °C).
- Kinetic parameters revealed a strong influence of the fertilizer used. The application of organic fertilizer significantly decreased the activation energy in all the samples, and especially in the seed ones.
- The high values of the frequency factor showed that the thermal decomposition of custard apple residues is a complex process, which involves endothermic and exothermic reactions.

Globally, it is confirmed that custard apple farming residues, seeds and pruning remains, have appropriate characteristics for energy recovery by combustion.