

# Trabajo Fin de Máster

## Máster en Ingeniería Ambiental

### Evaluación del uso del residuo de desmote de algodón como materia prima para la producción de biochar en Argentina

Autora: Macarena Soledad Cervera

Tutores: Pedro García Haro

Alicia Ronda Gálvez

**Dpto. Ingeniería Química y Ambiental**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2020





Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Ambiental

# Evaluación del uso del residuo de desmote de algodón como materia prima para la producción de biochar en Argentina

Autora:

Macarena Soledad Cervera

Tutores:

Pedro García Haro

Alicia Ronda Gálvez

Dpto. Ingeniería Química y Ambiental  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Máster: Evaluación del uso del residuo de desmote de algodón como materia prima para la producción de biochar en Argentina

Autora: Macarena Soledad Cervera

Tutores: Pedro García Haro

Alicia Ronda Gálvez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

*A mi mamá, Mercedes, por confiar en mí, por ser esa fuente de ejemplo y perseverancia, por siempre tener las justas palabras de aliento cuando las necesitaba y por apoyarme siempre.*

*A los más pequeños de la familia y a los que están por venir, por ellos me comprometo a trabajar para construir un mundo mejor.*

*Macarena Soledad Cervera  
Sevilla, 2020*



# Agradecimientos

---

Quiero hacer extenso mi especial agradecimiento a los tutores del presente trabajo, Pedro García Haro y Alicia Ronda Gálvez, por permitirme realizarlo bajo su coordinación, por su predisposición y el soporte brindado a lo largo de todo el proceso.

Agradecer también a Fátima Arroyo, profesora y coordinadora del Máster en Ingeniería Ambiental, quien me ha ayudado desde el primero momento, brindándome las herramientas necesarias para acceder al máster como alumna extranjera.

A todos los profesores del Máster, por compartir sus conocimientos, por su cercanía y por dar lo mejor en los tiempos adversos que hemos vivido.

A mi familia y amigos por el apoyo recibido durante este periodo fuera de casa, por sus palabras de aliento y por la confianza depositada en mí.

A Rocío, Julián, Giorgia, Diane, Carlos, Sara y Mike, mi familia en Sevilla, por compartir estos meses maravillosos de gran aprendizaje, por sostenernos mutuamente y por estar ahí siempre que los necesitaba.

A la vida misma, por ponerme en el camino circunstancias y personas maravillosas que me permiten crecer y evolucionar cada día.



# Resumen

---

La agricultura y las actividades asociadas a ella son fundamentales en el desarrollo económico de Argentina. Entre éstas se destaca la producción de algodón, la cual ocupa un importante rol en las economías regionales de las distintas provincias.

El desmotado es una de las etapas de la cadena de valor de la producción de algodón, en la cual se separa la fibra de la semilla. En ésta se genera una importante cantidad de residuos orgánicos que, a día de hoy, no tienen un destino establecido.

Los residuos producidos deben recibir una gestión adecuada para minimizar los impactos ambientales que puede causar; dentro de esta gestión se encuentra la valorización, proceso clave en el sistema de economía circular.

El presente trabajo pretende evaluar el aprovechamiento del residuo de desmote de algodón en Argentina como materia prima para la producción de biochar; para su posterior utilización como enmienda orgánica para suelos y como sumidero de carbono, contribuyendo de esta manera a la sostenibilidad de la actividad agrícola.



# Abstract

---

Agriculture and its associated activities are fundamental to the Argentina's economic development. Among these, the production of cotton stands out, which plays an important role in the regional economies of the different provinces.

Ginning is one of the stages in the value chain of cotton production, in which the fibers are separated from the seeds. This generates a significant amount of organic waste that, to date, has no defined destination.

The waste produced must be properly managed to minimize the environmental impacts it can cause; within this management is the recovery, a key process in the circular economy approach.

This work aims to assess the use of cotton ginning waste in Argentina as a raw material for the production of biochar, for its subsequent use as an organic soil amendment and as a carbon sink, thus contributing to the sustainability of agricultural activity.

<b>Agradecimientos</b>	<b>viii</b>
<b>Resumen</b>	<b>x</b>
<b>Abstract</b>	<b>xii</b>
<b>Índice</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvi</b>
<b>Notación</b>	<b>xvii</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Biochar</i>	2
1.1.1 Características	3
1.1.2 Objetivos en la aplicación del biochar	6
1.1.3 Métodos de aplicación al suelo	9
1.1.4 Métodos de producción	10
1.1.5 Materias Primas	15
1.2 <i>El Algodón</i>	18
1.2.1 Características generales	18
1.2.2 Importancia económica mundial	19
1.3 <i>Producción de algodón en Argentina</i>	20
1.3.1 Importancia económica en Argentina	20
1.3.2 Estructura de la cadena de valor	20
1.3.3 Localización territorial	22
1.3.4 Productos	23
1.3.5 Subproductos	24
1.3.6 Residuos	24
<b>2 OBJETIVOS Y ALCANCE</b>	<b>25</b>
2.1 <i>Objetivo general</i>	25
2.2 <i>Objetivos específicos</i>	25
2.3 <i>Alcance</i>	25
<b>3 CASO DE ESTUDIO</b>	<b>27</b>
3.1 <i>Producción primaria de algodón</i>	28
3.2 <i>Desmote</i>	29
3.2.1 Ubicación y capacidad de las plantas desmotadoras	31
3.2.2 Generación y disposición de residuos del desmote	32
3.2.3 Marco normativo para el manejo de RDD en Argentina	33
3.3 <i>Caracterización de los residuos generados en el proceso de desmote</i>	34
3.3.1 Lignina, celulosa y hemicelulosa	34
3.3.2 Humedad, densidad, tamaño de partícula	35
3.3.3 Análisis inmediato	35
3.3.4 Poder calorífico	37
3.3.5 Nutrientes y minerales	38

3.3.6	pH	38
3.4	<i>Proceso de producción de biochar a partir de RDD</i>	38
3.4.1	Parámetros de proceso	39
3.4.2	Balance de materia y energía	42
3.4.3	Características esperadas para el producto obtenido	49
3.4.4	Factores a tomar en consideración para la implementación de la producción	51
3.4.5	Retos y oportunidades	53
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>56</b>
<b>5</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>57</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1.1: Composición elemental total (g/kg) , relación C:N y rangos de pH de biochars de diferentes materias primas y diferentes temperaturas de pirólisis.	5
Tabla 1.2: Porcentaje productos post-pirólisis resultantes de diferentes temperaturas y tiempos de residencia.	14
Tabla 1.3: Clasificación de los diferentes tratamientos termoquímicos en función de las condiciones de proceso y el rendimiento de biochar.	14
Tabla 1.4: Componentes claves (% en peso) de diferentes materias primas para producción de biochar.	16
Tabla 1.5: Componentes claves (% en peso) en residuos de desmote para producción de biochar.	17
Tabla 1.6: Producción de algodón en Argentina de las últimas tres campañas.	20
Tabla 3.1: Número y capacidad de desmotadoras por provincia.	31
Tabla 3.2: Producción de algodón en Chaco y Santiago del Estero campaña 2017-2018.	33
Tabla 3.3: Componentes (% en peso base seca) en residuos de desmote.	34
Tabla 3.4: Análisis inmediato de residuos de desmote (% peso)	36
Tabla 3.5: Análisis elemental de residuos de desmote (% peso) y poder calorífico inferior (kJ/kg)	37
Tabla 3.6: Nutrientes y minerales (g/kg) y relación C/N presentes en los residuos de desmote.	38
Tabla 3.7: características de la pirólisis lenta.	40
Tabla 3.8: Franjas de temperatura características de la descomposición de materiales lignocelulósicos.	40
Tabla 3.9: Distribución de productos (rendimiento másico) de pirólisis lenta de RDD	44
Tabla 3.10: Resultados Balance de Materia	44
Tabla 3.11: Calor específico de los compuestos del proceso de pirólisis.	46
Tabla 3.12: Requerimiento energético del proceso de pirólisis para diferentes temperaturas.	47
Tabla 3.13: Composición del gas de pirólisis de residuos de algodón a diferentes temperaturas con sus respectivos poderes caloríficos y PCI del syngas.	48
Tabla 3.14: Valores máximos (mg/kg) establecidos para contenido de metales pesados en biochar.	51

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1.1: Biochar a partir de diferentes materias primas.	2
Figura 1.2: Estructura superficial de biochar de madera (WB) y biochar de cascarilla de arroz (RHB).	4
Figura 1.3: Principales objetivos de la aplicación de biochar .	7
Figura 1.4: Principales efectos del biochar sobre las características del suelo.	8
Figura 1.5: Esquema del proceso de pirólisis para la obtención de biochar.	13
Figura 1.6: Componentes principales de la biomasa lignocelulósica.	16
Figura 1.7: <i>Gossypium hirsutum</i> .	18
Figura 1.8: Producción de pelusa de algodón por país 2018.	19
Figura 1.9: Cadena de valor algodonera-textil en Argentina.	21
Figura 1.10: Plantas desmotadoras instaladas por décadas.	22
Figura 1.11: Fechas de siembra y cosecha.	23
Figura 1.12: Localización territorial de la producción de algodón en Argentina (2015-2016).	23
Figura 3.1: Cosechadora con sistema stripper.	28
Figura 3.2: Etapas del proceso de desmote.	30
Figura 3.3: Distribución geográfica de plantas desmotadoras.	31
Figura 3.4: Fracciones de desmote de algodón stripper.	32
Figura 3.5: Procesos de producción de biochar.	39
Figura 3.6: Proporción relativa de productos de pirólisis de biomasa.	41
Figura 3.7: Proceso de pirólisis	43
Figura 3.8: Pilares de la sostenibilidad.	54

# Notación

---

°C	grado centígrado
atm	atmósfera
C	Carbono
Ca	Calcio
Cd	Cadmio
CH <sub>4</sub>	Metano
CIC	Capacidad de intercambio catiónico
cm	centímetro
cm <sup>3</sup>	centímetro cúbico
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
COV	Compuestos orgánicos volátiles
Cr	Cromo
Cu	Cobre
EBC	European Biochar Certificate
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GEI	Gases de efecto invernadero
g	gramo
Gt	Gigatonelada
H	hidrógeno elemental
h	hora
H <sub>2</sub>	molécula de hidrógeno
ha	Hectárea
HAPs	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos
Hg	Mercurio
HTC	Carbonización hidrotermal
HTT	Temperatura de tratamiento más alta
IBI	International Biochar Initiative
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
K	Potasio
°K	grado Kelvin
kJ	kilojulio
m	metro
m <sup>2</sup>	metro cuadrado
Mg	Magnesio
min	minuto

---

Mn	Manganeso
MOS	Materia orgánica del suelo
N	Nitrógeno
Na	Sodio
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	ion amonio
Ni	Niquel
nm	nanómetro
NO <sub>x</sub>	Oxidos de nitrógeno
O	oxígeno elemental
O <sub>2</sub>	molécula de oxígeno
OGM	Organismos genéticamente modificados
P	Fósforo
Pb	Plomo
PCI	Poder calorífico inferior
PHAs	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
RDD	Residuos de desmote
s	Segundo
SEM	Microscopía electrónica de barrido
SENASA	Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria
Si	Silicio
SO <sub>3</sub>	Trióxido de azufre
t	tonelada
TVs	Temperaturas de volatilización
Zn	Zinc

# 1 INTRODUCCIÓN

---

En la actualidad, la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera continúa aumentando, lo que acelera el calentamiento global y está alterando el clima a escala planetaria. Según el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), el uso de la tierra contribuye con aproximadamente una cuarta parte de las emisiones de GEI, en particular emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) generadas en actividades como la deforestación, las emisiones de metano (CH<sub>4</sub>) del arroz y el ganado rumiante y las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) del uso de los fertilizantes (IPCC, 2020). Otro aspecto a considerar con efectos perjudiciales para el ambiente es la gran generación de desechos que se producen en el sector primario, ya sea residuos postcosecha, o los generados durante el procesamiento de los cultivos obtenidos.

En este contexto, la agricultura debe hacer frente a desafíos complejos y diversos, entre los que se destacan principalmente una creciente demanda de alimentos a nivel mundial y, como consecuencia de ello, un continuo uso abusivo de los suelos agrícolas lo que conduce a su degradación y pérdida de fertilidad. En este escenario, por un lado, la actividad agrícola contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero y por otra, se ve afectada negativamente por las consecuencias derivadas del cambio climático (incremento de temperatura, aumento de la aridez, etc.).

En Argentina, la agricultura tiene una importancia estratégica en la economía; la creciente demanda de productos agropecuarios constituye una gran oportunidad para su desarrollo a través de la producción primaria, del agregado de valor y de la agroindustria (Andrade, 2017). Además, dado que éste es uno de los países con mayores potenciales para la producción de alimentos, tiene una gran responsabilidad en la futura seguridad alimentaria del planeta. Los beneficios económicos producidos en las últimas décadas por la expansión e intensificación de la agricultura argentina estuvieron asociados con significativos impactos sobre el ambiente. Entre los impactos negativos debido a su desarrollo, se destacan la deforestación, la degradación de los suelos, la contaminación con agroquímicos, la pérdida de biodiversidad, y las emisiones de gases de efecto invernadero (Andrade, 2017).

Es por tanto necesario aportar mejoras para promover una agricultura sostenible a largo plazo. La implementación de técnicas agronómicas más sostenibles es fundamental para evitar y reducir fenómenos de contaminación y emisiones gaseosas, mejorar la calidad del suelo y el rendimiento de los cultivos y de ésta manera mitigar el cambio climático.

El biochar es un material rico en carbono que se obtiene a partir de la descomposición termoquímica de materia orgánica, en una atmósfera limitada de oxígeno. Para su producción se pueden emplear distintos procesos, el más utilizado es el proceso de pirólisis. En éste, el carbono existente en la materia orgánica se estabiliza, dando como resultado un material resistente a la descomposición química y biológica. Por ello, su degradación al ser incorporado al suelo es muy lenta, de esta manera el carbono no es emitido a la atmósfera como ocurre con la descomposición de materia orgánica sin pirolizar.

Las características del biochar no sólo le confieren la capacidad potencial de secuestrar carbono sino también contribuye a mejorar las propiedades físico-químicas del suelo y a aumentar la productividad de los cultivos. Además, su producción conlleva el aprovechamiento energético de los bio-aceites y gases que también se originan durante el proceso de pirólisis, reduciendo así la utilización de compuestos derivados del petróleo (Lehmann & Joseph, 2015). Por todos estos motivos, las investigaciones sobre este prometedor material han ido en aumento en los últimos años.

En la producción agrícola mundial, el algodón ocupa una posición de gran importancia; la fibra de algodón es una fibra distinguida que sirve como materia prima para las industrias textiles que tienen

un impacto económico significativo anual de al menos 600 000 M\$ (Khan et al., 2020). En Argentina, la producción de algodón, la cual ocupa un importante rol en las economías regionales de las distintas provincias, genera principalmente residuos orgánicos tras el proceso de desmote, en el cual se separa la fibra de la semilla; dichos residuos pueden alcanzar valores del 15% al 30% del algodón en bruto (Bela, 2017).

Debido a que entre las materias primas que se pueden emplear para la producción de biochar se encuentran los desechos agrícolas, en el presente trabajo se plantea la posibilidad de producir biochar a partir de los residuos de desmote para ser utilizado como enmienda orgánica para suelos y como sumidero de carbono.

## 1.1 Biochar

De acuerdo con la International Biochar Initiative (IBI), “el biochar es un material sólido obtenido de la conversión termoquímica de biomasa en entornos con poco oxígeno”. Éste se produce por descomposición térmica de material orgánico bajo un suministro limitado de oxígeno y a temperaturas relativamente bajas (<700 °C). Este proceso refleja la producción de carbón vegetal (charcoal), sin embargo, el biochar se puede distinguir del carbón vegetal, que se usa principalmente como combustible, en el sentido de que su principal aplicación es ser utilizado como enmienda del suelo con la intención de mejorar las funciones del mismo y reducir las emisiones de la biomasa mediante la captura de carbono, que de otra manera se degradarían naturalmente liberando gases de efecto invernadero (International Biochar Initiative, 2012).



Figura 1.1: Biochar a partir de diferentes materias primas.

Fuente: (Division of Agriculture and Natural Resources, s. f.)

El concepto de biochar es relativamente reciente y el interés por su aplicación a suelos agrícolas está asociado al descubrimiento de sustancias de similar naturaleza en tierras oscuras del Amazona, conocidas localmente como Terra Preta do Indio, a las que se llamó ADE por sus siglas en inglés: Amazonian Dark Earths. Estos suelos son muy fértiles y se destacan principalmente por ser ricos en carbono orgánico, lo que marca una diferencia respecto a los suelos comunes de la selva amazónica que suelen ser pobres en nutrientes (Lehmann, 2009).

En la actualidad se considera que la terra preta amazónica es resultado del manejo del suelo practicado por sociedades locales que habitaron la región antes del arribo de los europeos. Existen diversas teorías para explicar su formación, algunas consideran que son un subproducto accidental de la habitación de las poblaciones locales, mientras que otras creen que estos suelos se formaron por la quema intencionada de malezas para la obtención de tierras de cultivo (Glaser et al., 2001). A partir de esta

teoría nació la idea de aumentar la fertilidad del suelo mediante la quema de residuos orgánicos y su posterior deposición y mezcla en él.

Muchos estudios han demostrado que el biochar es un recurso útil y puede mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo, manteniendo los niveles de materia orgánica del suelo (MOS), aumentando la eficiencia en el uso de fertilizantes y aumentando la producción de cultivos, particularmente para suelos cultivados a largo plazo en regiones subtropicales y tropicales. Cuando este material se incorpora a los suelos, su contribución a la naturaleza física del sistema puede ser significativa, con efectos sobre la estructura del suelo, la porosidad, la consistencia y la inclinación al cambiar la densidad aparente, el cambio de agregados, la distribución del tamaño de poro, etc. (Bolan et al., 2019). Estos hallazgos impulsaron la investigación del biochar como enmienda para el suelo en distintas partes del mundo.

### 1.1.1 Características

Las características fisicoquímicas del biochar están fuertemente asociadas con las materias primas empleadas para su producción, el tipo de proceso utilizado y las condiciones de proceso. Sin embargo, los distintos tipos de biochars comparten ciertas características en común.

Rebolledo y otros (2016) realizaron una recopilación de información bibliográfica de diferentes estudios realizados en distintos tipos de biochars, en donde se destaca que los mismos presentan muy baja densidad

aparente (entre 0,30 a 0,43 g/cm<sup>3</sup>), una alta área superficial (entre 200 y 400 m<sup>2</sup>/g) y todos tienen una alta porosidad (la cual depende de la fuente y tamaño de la materia prima).

#### 1.1.1.1 Estructura y microestructura

Las propiedades de superficie y la estructura son características importantes, ya que influyen en las funciones esenciales para la capacidad de retención de agua, nutrientes y actividad microbiana.

Según diferentes estudios realizados en distintos tipos de biochars, la capacidad hidrofílica parece estar influenciada por la temperatura de tratamiento más alta (HTT), observándose que dicha capacidad aumenta en los biochar pirolizados con temperaturas superiores a 400 °C, independientemente del tipo de materia prima utilizada. Se asume que la HTT aumenta el espaciado regular estructurado entre los planos que se forman. Las distancias interplanares disminuyen con el aumento del orden y la organización de las moléculas, lo cual da como resultado áreas de superficie más grandes por volumen. Un área superficial específica más alta y más microporos resultantes de temperaturas de pirolización más altas podrían ser el factor crítico para retener agua (Bolan et al., 2019).

En cuanto a la estructura porosa de los biochars, el volumen total de poros puede dividirse en microporos (poros de diámetro interno menor a 2 nm), mesoporos (poros de ancho interno entre 2 nm y 50 nm) y macroporos (poros internos ancho mayor de 50 nm). Los macroporos son relevantes para las funciones vitales del suelo, como la aireación y la hidrología y sirven como hábitats para una gran variedad de microbios del suelo (Lehmann, 2009)

Con respecto a los mesoporos y microporos, Lehmann y Joseph (2015) compilaron datos para demostrar la relación entre el volumen de microporos y el área superficial total, proporcionando evidencia de que los tamaños de poro distribuidos en el rango de microporos hacen la mayor contribución al área de superficie total. Varios grupos de investigación han demostrado el desarrollo de la microporosidad con temperaturas de producción más altas y tiempos de residencia de reacción más largos. Las temperaturas elevadas proporcionan las energías de activación y las retenciones más largas permiten que las reacciones se completen, lo que lleva a mayores grados de orden en las estructuras. Es por ello que el área superficial generalmente aumenta con el aumento de HTT hasta que alcanza la temperatura a la que se produce la deformación, lo que resulta en disminuciones posteriores en el área superficial (Bolan et al., 2019). En la Figura 1.2 se observa la estructura porosa de biochar de madera (WB) y el biochar de cascarilla de arroz (RHB) con diferentes temperaturas de pirólisis utilizando microscopía electrónica de barrido (SEM).

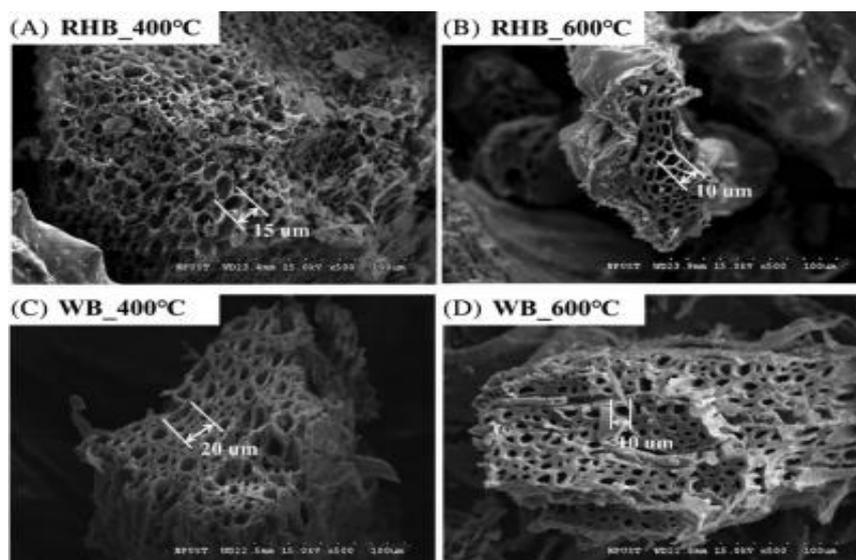


Figura 1.2: Estructura superficial de biochar de madera (WB) y biochar de cascarilla de arroz (RHB).

Fuente: (Bolan et al., 2019)

### 1.1.1.2 Composición

Cada partícula de biochar consiste de dos fracciones estructurales principales: láminas juntas de grafeno cristalino y estructuras aromáticas amorfas ordenadas, ambas asociadas con enlaces de carbono (C) en forma de anillos de tipo benceno con oxígeno (O) o hidrógeno (H). Estos enlaces entre estructuras aromáticas de C – O y C – H gobiernan la estabilidad del biochar (Lehmann y Joseph, 2009).

El biochar se caracteriza por un contenido elevado de carbono recalcitrante, el cual presenta una gran estabilidad y le confiere su elevado potencial de secuestro de C, ayudando además en el mantenimiento a largo plazo del contenido de carbono orgánico del suelo y la fertilidad del mismo (Bolan et al., 2019). Esta característica, generada a través de la modificación térmica de la biomasa durante el proceso de pirólisis, es significativa porque da como resultado una propiedad fundamental de biochar: la capacidad de persistir en el suelo al no ser susceptible a la descomposición biológica. Esto hace que el biochar actúe como un medio facilitador de reacciones beneficiosas para la dinámica del suelo y no sea una materia prima consumida, a diferencia los fertilizantes y otros componentes que son asimilados por los sistemas vivos, o transformada gradualmente, como en el caso de la descomposición de turba, compost o estiércol en suelos (McLaughlin et al., 2009).

Además de C recalcitrante, los biochars pueden contener C soluble generado a partir del contenido de

materia volátil presente en el biochar, el cual puede precipitar fácilmente en el suelo. Es por ello que el contenido de material volátil es usado como una medida de la susceptibilidad del biochar a degradarse. Este carbono soluble puede causar deficiencia de nutrientes a corto plazo porque estimula el crecimiento de microorganismos que compiten con las plantas por nitrógeno disponible; en adición a ello, desaparece en un tiempo poco prolongado, sin contribuir a mejorar las propiedades del suelo a largo plazo (McLaughlin et al., 2009).

La composición química es muy variable, y depende fundamentalmente de las materias primas utilizadas. El nitrógeno (N) de la biomasa original puede no estar realmente disponible. El fósforo (P) generalmente es conservado durante la volatilización de moléculas orgánicas asociadas y está presente como cenizas dentro del biochar, y al solubilizarse queda disponible para las plantas (Qian et al., 2015). Además, en su composición se destaca la presencia de nutrientes como Potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg), asociados a su fracción mineral (Lehmann & Joseph, 2015). La Tabla 1.1 resume la composición elemental total (C, N, C: N, P, K, P disponible y N mineral) y rangos de pH de biochars de una variedad de materias primas (madera, desechos verdes, residuos de cultivos, lodos de depuración, basura, cáscaras de nuez) y condiciones de pirólisis (350-500 °C) utilizadas en varios estudios.

Tabla 1.1: Composición elemental total (g/kg), relación C:N y rangos de pH de biochars de diferentes materias primas y diferentes temperaturas de pirólisis.

Fuente: (Verheijen et al., 2010)

	pH	C	N	N (NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	C:N	P	K
<b>Valor inferior</b>	6,2	172	1,7	0,0	7	0,2	1,0
<b>Valor superior</b>	9,6	905	78,2	2,0	500	73,0	58
<b>MEDIA</b>	8,1	543	22,3	-	61	23,7	24,3

### 1.1.1.3 PH y Capacidad de Intercambio Catiónico

Diferentes estudios de caracterización de biochar han arrojado valores en donde el pH varía de levemente ácido a alcalino, con una media de pH de 8,1 y un intervalo entre 6,2 y 13 (Qian et al., 2015).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) define a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) como una medida de la cantidad de cargas negativas presentes en las superficies de los minerales y componentes orgánicos que conforman un determinado suelo, y representa la cantidad de cationes que las superficies pueden retener (Ca, Mg, Na, K, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> etc.). Éstos serán intercambiados por otros cationes o iones de hidrogeno presentes en la solución del suelo y liberados por las raíces de las plantas. El nivel de CIC indica la habilidad de estos materiales para retener cationes, lo que influye en la disponibilidad y cantidad de nutrientes que absorben las plantas que se encuentran en esos suelos. Un suelo con bajo CIC indica baja habilidad de retener nutrientes, como por ejemplo en suelos arenosos o pobres en materia orgánica (*Portal de Suelos de la FAO, 2020*).

La CIC de los biochars es muy variable y cambia después de su incorporación a los suelos por las interacciones con el ambiente. Los responsables del incremento de la CIC y la reactividad del biochar

en el suelo son los grupos carboxílicos que se forman sobre los puentes de núcleos aromáticos del biochar que resultan de su oxidación. Se ha demostrado que la CIC puede ser muy baja cuando se usan bajas temperaturas en la pirólisis pero se incrementa significativamente a temperaturas más altas, y también se sabe que estos materiales presentan una mayor capacidad de intercambio de cationes por unidad de carbono que la materia orgánica del suelo (Rebolledo et al., 2016).

Las cargas superficiales del biochar pueden ser positivas, principalmente en los biochars recién preparados. A medida que avanza el envejecimiento del biochar se generan más cargas negativas que positivas y se incrementa la acidez superficial con el consecuente decrecimiento de la basicidad (Lehmann, 2009). Los cambios en las cargas superficiales del biochar están correlacionados muy fuertemente con el tiempo y las temperaturas anuales medias. Los biochars maduros presentan mayor CIC que los jóvenes, por su contacto con el oxígeno y el agua. La CIC se reduce conforme a la disminución del pH del biochar, así valores de CIC son bajos a pH bajo y se incrementa a pH alcalinos (Rebolledo et al., 2016).

Actualmente, organizaciones internacionales como *IBI* y *European Biochar Certificate* (EBC) han determinado parámetros y pautas de prueba con el objetivo de definir de forma consistente qué es el biochar y las características necesarias que debe tener para un uso seguro. Estos parámetros incluyen el pH, el contenido de carbono y nutrientes, la porosidad, el área específica, así como el contenido de contaminantes permitido.

Se debe considerar que el biochar puede experimentar cambios químicos y estructurales durante los procesos de envejecimiento, lo que puede modificar sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Lehmann & Joseph, 2015). Además, por todo lo expuesto anteriormente, dependiendo de las propiedades del suelo y del objetivo a conseguir, será necesario realizar una caracterización previa y completa del biochar para determinar qué tipo de biochar se debe utilizar. Por ejemplo, en suelos ácidos es aconsejable aplicar biochars con pH elevado, mientras que biochars con altos contenidos en C recalcitrante son recomendables si el objetivo principal es el secuestro de C.

### 1.1.2 Objetivos en la aplicación del biochar

Una de las características más atractiva del biochar es el hecho de que representa un proceso sostenible y fácil de producir, que permite la obtención de materiales con múltiples aplicaciones a un costo menor en comparación con los materiales producidos a partir de procesos petroquímicos u otros procesos químicos. En los últimos años, comenzó a ser estudiado como una nueva herramienta para otras aplicaciones más allá del uso como enmienda orgánica, entre ellas se destaca la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, aplicaciones en catálisis, purificación de agua y almacenamiento de energía y gas (Qian et al., 2015). El presente trabajo se centra en la producción de biochar para su utilización como enmienda orgánica para suelos y como sumidero de carbono, favoreciendo además a la gestión de residuos. En la Figura 1.3 se esquematizan estos objetivos, los cuales se detallan a continuación.

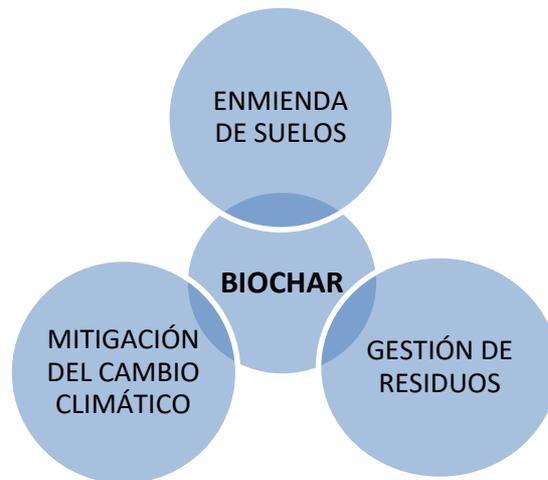


Figura 1.3: Principales objetivos de la aplicación de biochar .

Fuente: Elaboración propia a partir de ( Lehmann y Joseph 2009)

#### 1.1.2.1 Biochar como enmienda orgánica y sus efectos sobre el suelo

El principio de porqué el biochar actúa como una enmienda valiosa del suelo se basa principalmente en su recalcitrancia y su capacidad para retener nutrientes. Como se muestra en la Figura 1.4, este material puede generar numerosos beneficios en los suelos donde es aplicado. A pesar de ello, efectos sobre la biología del suelo aun no son comprendidos profundamente; se sabe que puede tener beneficios sustanciales, pero hasta ahora en gran medida no cuantificados para la productividad de los cultivos. Debido a esto, el biochar debe considerarse principalmente como un acondicionador del suelo y no como un fertilizante ya que, aunque mejora las funciones esenciales del suelo, no reemplaza la necesidad de adiciones de nutrientes a través de fertilizantes (Lehmann, 2009). Sin embargo, como se mencionó anteriormente, algunos tipos de biochars pueden contener cantidades significativas de nutrientes solubles, que en ciertas condiciones pueden mejorar la nutrición y la productividad de las plantas mediante la adición directa de estos nutrientes, aunque en algunos tipos de biochar la liberación puede ser más lenta y los nutrientes pueden ser menos propensos a las pérdidas por lixiviación que si se añaden por separado (Lehmann, 2009). Por otro lado, la retención de nutrientes en el suelo puede verse aumentada debido al aumento de la CIC del suelo generada por la incorporación de biochar.

Debido a la conformación estructural del biochar, al añadirlo al suelo aumenta la porosidad de éste, mejorando su capacidad de infiltración y su permeabilidad, contribuyendo a las condiciones de oxigenación para las plantas y reduciendo la escorrentía y los costos de riego (Rebolledo et al., 2016). Su estructura porosa puede además permitir el albergue en su interior de diferentes microorganismos beneficiosos para el suelo. Por su porosidad, el biochar tiene una densidad aparente mucho más baja que la de los suelos minerales y, por lo tanto, la aplicación de éste puede reducir la densidad aparente general del suelo, lo que se traduce a una menor compactación y mayor aireación del mismo. Sin embargo, también es posible aumentarla, esto podría ocurrir si el biochar que se aplica tiene una baja resistencia mecánica y se desintegra con relativa rapidez en pequeñas partículas que llenan los espacios porosos existentes en el suelo, entonces la densidad aparente seca del suelo aumentará (Verheijen et al., 2010).

El porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre ella, conocida como albedo, es un importante factor que influye en el cambio climático global. El color oscuro que el biochar le confiere al suelo puede reducir el albedo, aumentando la temperatura del suelo debido a una mayor absorción de radiaciones solares. La reducción de la humedad que podría ocurrir debido al aumento en la absorción de radiación solar se compensa por la alta capacidad de retención de agua del biochar (Verheijen et al., 2010). El aumento de la temperatura del suelo junto con el aumento de la capacidad de retención de agua y del contenido de nutrientes tras la adición del biochar puede beneficiar a la germinación de semillas y a la actividad microbiana (Pietro, 2016).

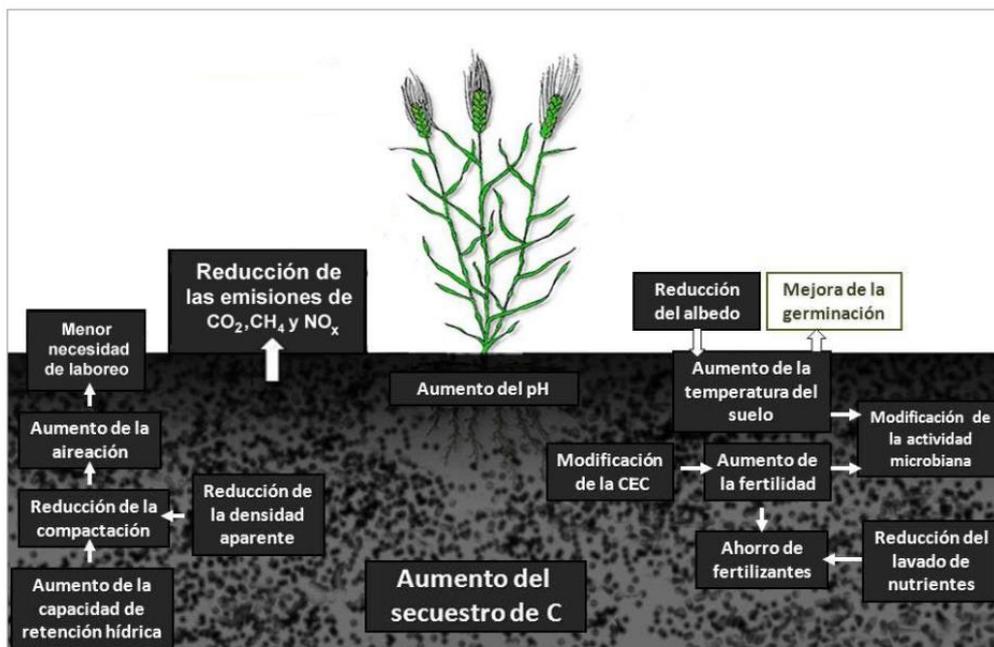


Figura 1.4: Principales efectos del biochar sobre las características del suelo.

Fuente: (Pietro, 2016)

Además, el biochar puede favorecer la sorción de compuestos orgánicos como pesticidas y herbicidas, así como compuestos hidrofóbicos como hidrocarburos presentes en suelos contaminados, contribuyendo así a evitar efectos nocivos a corto y largo plazo (Verheijen et al., 2009). En adición, al tener el biochar un pH principalmente alcalino, el pH del suelo tiende a aumentar tras su incorporación.

### 1.1.2.2 Biochar como sumidero de carbono

El principio de utilizar el biochar para el secuestro de carbono se relaciona con el papel de los suelos en el ciclo del C. El flujo global de  $\text{CO}_2$  de los suelos a la atmósfera es de alrededor de 60 Gt de carbono por año. Este  $\text{CO}_2$  es principalmente el resultado de la respiración microbiana dentro del sistema del suelo, ya que los microbios descomponen la MOS (Verheijen et al., 2010). Como se mencionó anteriormente, una de las características más importantes del biochar es su contenido elevado de carbono recalcitrante, el cual resiste la oxidación química y biológica, de esta manera se ralentiza la velocidad a la que se degrada en el suelo. Su tiempo de residencia es de cientos a miles de años, siendo considerablemente superior que los tiempos de residencia de la mayoría de MOS (Rebolledo et al., 2016). Por tanto, la velocidad de emisión de carbono que se libera a la atmósfera también disminuye. De esta manera, el biochar permite que la entrada de C en el suelo aumente en gran medida en comparación con la salida de C a través de la respiración microbiana del suelo, y es esto lo que constituye a la posibilidad de actuación como un sumidero potencial de carbono (Verheijen et al., 2009) y en consecuencia, a la mitigación del exceso de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera.

En este sentido, la mitigación de emisiones de GEI utilizando biochar como enmienda para el suelo se

da de forma directa, a través del secuestro de C en el suelo durante cientos o incluso miles de años, e indirectamente mejorando la fertilidad del suelo y la salud general del mismo. Los suelos fértiles favorecen el crecimiento de las plantas, lo que conduce a un aumento en el consumo de CO<sub>2</sub>. En adición a ello, la mejora de la fertilidad del suelo también reduce la necesidad de incorporar fertilizantes y así se pueden reducir las emisiones de carbono durante su producción, transporte y aplicación (Qian et al., 2015).

La utilización de biochar también evita las emisiones en situaciones en las que éste se produce a partir de residuos que normalmente se descompondrían anaeróbicamente. De esta manera, la incorporación de biochar al suelo también puede reducir las emisiones de otros gases de efecto invernadero, como los óxidos de nitrógeno y el metano.

### 1.1.2.3 Biochar como herramienta para la gestión y minimización de residuos

La producción de biochar a partir de biomasa residual representa una opción en la gestión sostenible de los residuos orgánicos ya que los mismos pueden ser usados como materia prima para su generación. De esta manera, se evita además, la promoción del cultivo de especies destinadas exclusivamente a la producción de este material, práctica que no resulta sostenible (Cely Parra, 2016).

Por otro lado, aunque la aplicación directa de residuos orgánicos en suelos forma parte de las prácticas habituales de la agricultura, al ser usado como enmienda orgánica, el biochar puede influir positivamente en la disminución de riesgos ambientales asociados a dichas prácticas, como ser la eutrofización de acuíferos, ríos y / o embalses; la contaminación del suelo por nitratos; o la contaminación de cultivos por microorganismos patógenos.

### 1.1.3 Métodos de aplicación al suelo

Para la aplicación de biochar al suelo deben considerarse diferentes factores según las características del lugar y los objetivos de su aplicación. Dentro de las consideraciones a tener en cuenta se pueden citar los factores relacionados con el tipo de suelo, las prácticas de cultivo, las condiciones del entorno como ser el clima y la humedad, la forma de aplicación (manual o con maquinaria), entre otras.

Antes de aplicarlo, es conveniente realizar experimentos previos para decidir las cantidades a aplicar. Estudios previos han establecido la aplicación de cantidades de biochar que se encuentran entre 10 t/ha y 50 t/ha (Fiallos Ortega et al., 2015; Lehmann & Joseph, 2015; Verheijen et al., 2010).

En términos generales, hay tres enfoques principales para su aplicación:

- i) incorporación en la capa superior del suelo.
- ii) aplicación en profundidad.
- iii) cobertura sobre la capa superior del suelo.

Para la incorporación de biochar en la capa superior de la tierra, el biochar puede aplicarse solo o combinado con abonos o estiércol. El grado de mezcla dependerá de las técnicas de cultivo utilizadas: en los sistemas de labranza convencionales, el biochar (y el abono/estiércol/purín) se mezcla generalmente de forma homogénea en toda la capa superior del suelo (en la mayoría de los suelos cultivables de 0-15/30 cm de profundidad). La erosión provocada por el viento y el agua pueden eliminar parte del biochar aplicado; sin embargo, la mezcla con compost o estiércol reduce este riesgo. Mientras que en los sistemas de labranza de conservación, la profundidad de incorporación se reduce (lo que dará lugar a mayores concentraciones de biocarbón a tasas de aplicación iguales) y posiblemente un gradiente de concentración que disminuirá con la profundidad (Verheijen et al., 2010).

El arado profundo da lugar a una aplicación en profundidad, con una mayor homogeneización de la capa superior del suelo durante el arado subsiguiente. El posterior arado con vertedera y el cultivo

homogeneizarán aún más la distribución del biocarbón a través de la capa superior del suelo.

Se cree que la colocación del biocarbón directamente en la rizosfera es más beneficiosa para el crecimiento de los cultivos y menos susceptible a la erosión (Verheijen et al., 2010). La aplicación puede realizarse mediante sistemas neumáticos, que pueden funcionar a altas velocidades, o aplicando el biocarbón en surcos o zanjas y nivelando posteriormente la superficie del suelo.

La cobertura de biocarbón sobre el suelo es la propagación de biocarbón (fracción de polvo principalmente) a la superficie del suelo y se basa en procesos naturales para la incorporación del biocarbón en la capa superficial del suelo. Esta forma de aplicación se está considerando principalmente para aquellas situaciones en las que la incorporación mecánica no es posible, por ejemplo, sistemas de labranza cero, bosques y pastos. Un inconveniente obvio es el riesgo de erosión por el agua y el viento, así como la salud humana (inhalación) y los impactos en otros componentes del ecosistema (por ejemplo, agua superficial, superficies de las hojas, etc.) (Verheijen et al., 2010).

En cuanto a la frecuencia de aplicación, las bajas cantidades de adiciones anuales en combinación con la fertilización inorgánica u orgánica es una posibilidad que podría tener ventajas de procedimiento en determinadas condiciones. Por ejemplo, la distribución de biochar puede combinarse con una precipitación de bicarbonato de amonio en sus superficies, lo que puede ser energéticamente y posiblemente económicamente ventajoso para crear un biochar rico en nitrógeno. La utilidad de esta estrategia dependerá del sistema de cultivo específico y del equipo agrícola utilizado para aplicar los fertilizantes (Lehmann, 2009). Las aplicaciones únicas y a gran escala pueden ser la estrategia preferida cuando se requiere una rápida mejora del suelo, cuando no se dispone regularmente de materia prima para producirlo, o cuando la economía favorece las aplicaciones únicas mediante la posible reducción de los costos de transporte. Además, debido a su recalcitrancia, su efecto perdura en el suelo por lo que no es necesario aplicarlo repetidamente en un cultivo como en el caso de abonos o compost (Rebolledo et al., 2016).

#### **1.1.4 Métodos de producción**

Los biochars son sólidos carbonosos producidos a partir de la descomposición termoquímica de madera u otras materias orgánicas en un ambiente limitado de O<sub>2</sub>. Se produce en forma sólida a través de la pirólisis, la torrefacción seca o a través de la gasificación de biomasa, y en forma de suspensión por carbonización hidrotermal.

Estos procesos termoquímicos se emplean para convertir la biomasa en biocombustibles y bioproductos (Qian et al., 2015). Mediante ellos, las estructuras rígidas de los polímeros de la biomasa se descomponen térmicamente en cadenas pequeñas y de bajo peso molecular, liberando una fase de vapor y generando una fase sólida residual (biochar). Si los vapores son enfriados ocurre una condensación en compuestos líquidos (bio-aceite), mientras que los compuestos volátiles de bajo peso molecular como CO, el CO<sub>2</sub>, el CH<sub>4</sub> y el H<sub>2</sub> permanecen en la fase gaseosa (gas de síntesis o syngas) (Rebolledo et al., 2016). El gas de síntesis y el bio-aceite se consideran importantes productos intermedios que pueden utilizarse para crear combustibles alternativos a los combustibles convencionales (Qian et al., 2015). Las proporciones de estos tres componentes varía según la materia prima utilizada y según el tipo de proceso empleado, los cuales difieren unos de otros principalmente en las condiciones de operación que se emplean.

##### **1.1.4.1 Torrefacción**

La torrefacción seca o también llamada pirólisis leve, es un proceso mediante el cual se calienta la biomasa a 200°C – 300°C en un ambiente inerte durante un tiempo de residencia de 30 minutos a unas pocas horas. Este proceso da lugar a una pérdida de masa de aproximadamente el 30%, y sólo el 10%

de la energía contenida en la biomasa se pierde en forma de gases. Por lo tanto, la densidad de energía específica del producto sólido torrefacto se incrementa (Lee et al., 2019).

Este método se emplea en el campo de la bioenergía como un paso importante de preprocesamiento para mejorar las propiedades fisicoquímicas de la biomasa para la combustión (Bergman et al., 2005). Sin embargo, la biomasa torrefacta no puede definirse como biochar, porque la torrefacción es sólo el comienzo del proceso de pirólisis; por lo tanto, la biomasa torrefacta sigue conteniendo algunos compuestos orgánicos volátiles (compuestos originales de la biomasa). En lo que respecta a sus propiedades fisicoquímicas, la biomasa torrefacta tiene propiedades intermedias entre las de la biomasa bruta y el biochar (Kambo & Dutta, 2015).

#### 1.1.4.2 Gasificación

La gasificación emplea el suministro de una cantidad controlada de agente oxidante a alta temperatura (superior a 700 °C), transformando la biomasa principalmente en una mezcla gaseosa (syngas) que contiene CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y cantidades más pequeñas de hidrocarburos superiores. El agente oxidante utilizado puede ser oxígeno, aire, vapor o mezclas de estos gases. Un proceso de gasificación ideal no debería producir biochar. Sin embargo, en la práctica, el rendimiento de producción de biochar es de alrededor del 10 % en peso de biomasa (Qian et al., 2015).

Además de su bajo rendimiento, el biochar obtenido de la gasificación de la biomasa contiene diversos metales alcalinos y alcalinotérreos (Ca, K, Si, Mg, etc.) e hidrocarburos aromáticos policíclicos, los cuales son compuestos tóxicos producidos a altas temperaturas, por lo que la utilización de materiales que contienen este tipo de compuestos puede ser problemática (Lee et al., 2019).

#### 1.1.4.3 Carbonización hidrotermal

La carbonización hidrotermal (HTC), también conocida como torrefacción húmeda, es un proceso termoquímico de conversión de materia prima orgánica en un producto sólido de alto contenido en carbono, comúnmente llamado hidrochar (Kambo & Dutta, 2015). Tiene lugar en agua a temperaturas elevadas (160 °C – 800 °C). La presión de reacción también es elevada (superior a 1 atm) para mantener el agua en forma líquida. Según la temperatura de reacción, la HTC puede dividirse en HTC de alta temperatura (entre 300 °C y 800 °C) y HTC a baja temperatura (por debajo de 300 °C) (Qian et al., 2015).

En la HTC a altas temperaturas la reacción dominante es la gasificación hidrotermal, y los productos principales son gases como CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>. Para producir un producto sólido, la temperatura de reacción debe ser limitada para evitar la gasificación y la licuefacción. El rango de temperatura empleado para producir biochar a través de HTC es de 180 - 260 °C (Kambo & Dutta, 2015). En este sentido, la HTC a baja temperatura puede imitar la carbonificación natural de la biomasa, aunque la velocidad de reacción es mayor y el tiempo de reacción es más corto en comparación con los cientos de años de la carbonificación natural de biomasa. El rendimiento de carbón vegetal de biomasa a baja temperatura varía de 45% a 70% dependiendo de las propiedades de la materia prima, temperatura de reacción y presión (Kruse et al., 2013).

Como el proceso en sí se lleva a cabo en presencia de agua, no se ve afectado por el contenido de humedad de la materia prima. Esta ventaja única del proceso HTC elimina el requisito de presecado de la biomasa húmeda, que es un proceso de gran intensidad energética y una carga financiera en el preprocesamiento de la biomasa, especialmente cuando se realiza bajo pretratamientos térmicos convencionales como la torrefacción seca (Benavente et al., 2015). Sin embargo, el biochar obtenido se encuentra en estado húmedo y en forma de lodo; por lo tanto, tiene que pasar por una serie de pasos como la deshidratación mecánica (compresión), el filtrado y el secado solar/térmico antes de poder ser utilizado.

Por lo general, la deshidratación mecánica de materiales húmedos como el lodo y la pulpa de papel

puede reducir el contenido de humedad a un rango de 70 -75%. Sin embargo, el secado térmico es necesario para lograr un contenido de humedad aún más bajo (Kambo & Dutta, 2015). Dado que un proceso HTC de biomasa elimina una fracción del oxígeno de la materia prima mediante reacciones de descarboxilación y deshidratación, el contenido de humedad de un material pretratado hidrotermalmente puede alcanzar a un valor inferior al 50% sólo por compresión, reduciendo en última instancia el consumo de energía suplementaria y de tiempo en el secado (Kambo & Dutta, 2015).

Según datos obtenidos a partir de diferentes estudios y expuestos por Kambo & Dutta (2015), para un proceso HTC, se añade agua al sistema en una proporción de 3-0 veces la masa de biomasa seca. Por tanto, para una planta industrial HTC, el suministro continuo de agua de proceso es uno de los desafíos para su operación ya que es posible que se necesiten cantidades masivas de agua en la operación a escala completa, lo que puede no ser un proceso económico.

Aunque presenta algunas ventajas, el hidrochar obtenido por medio del HTC típicamente tiene una superficie y una porosidad muy pobres en comparación con el biochar obtenido a través de la pirólisis lenta (Kambo & Dutta, 2015). Según la información recopilada por Kambo & Dutta (2015), en un estudio realizado con maíz como materia prima se observó que el área de superficie BET de las muestras de biochar e hidrochar obtenidas mediante pirólisis (a 550°C durante 15 min) y HTC (a 250°C durante 4 h) fue de 12 y 4 m<sup>2</sup>/g, respectivamente. Mientras que, en otro estudio, en el que se utilizaron muestras de madera de pino, se informó de una superficie de 21 m<sup>2</sup>/g para las muestras preparadas por medio del HTC (a 300 °C durante 20 min a una tasa de calentamiento de 10 °C/min) y 29 m<sup>2</sup>/g para la misma materia prima pretratada por pirólisis (a 700 °C durante 2 h a una tasa de calentamiento de 10 °C/min).

En adición a lo anteriormente expuesto, aunque hasta la fecha muy pocos estudios han investigado las posibilidades de utilizar los hidrochars para el secuestro de carbono en el suelo, los resultados de estos estudios no son favorables debido a su baja estabilidad en el suelo y rápida descomposición (Kambo & Dutta, 2015).

#### **1.1.4.4 Pirólisis**

A la descomposición química de una sustancia orgánica por calentamiento en ausencia de oxígeno se la denomina pirólisis. En la práctica, no es posible crear un entorno completamente libre de oxígeno y, como tal, siempre se producirá una pequeña cantidad de oxidación. Sin embargo, el grado de oxidación es relativamente pequeño en comparación con la combustión donde ocurre una oxidación casi completa de la materia orgánica, Por este motivo, en la pirólisis una proporción sustancialmente mayor del carbono permanece en la materia prima y no se libera como CO<sub>2</sub> (Verheijen et al., 2010). En la Figura 1.5 se esquematiza el proceso de pirólisis para la obtención de biochar.

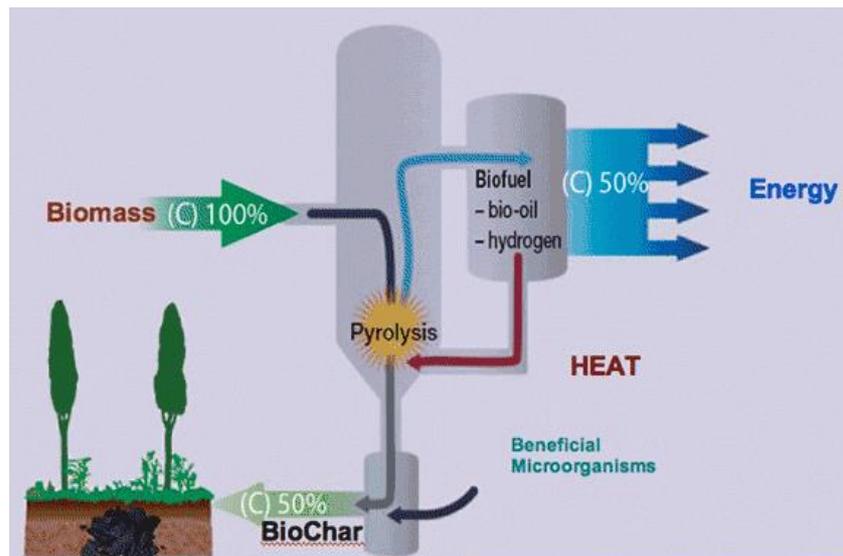


Figura 1.5: Esquema del proceso de pirólisis para la obtención de biochar.

Fuente: (*International Biochar Initiative*, 2012)

Las transformaciones físicas y químicas que ocurren durante la pirólisis son muy complejas y dependen tanto de la naturaleza de la biomasa como de las condiciones de la reacción. Este es el método más empleado en la producción de biochars (Qian et al., 2015). La descarboxilación, deshidratación, descarbonatación, desmetoxilación, desorden intermolecular, condensación, aromatización, etc. son algunas de las reacciones químicas propuestas que tienen lugar durante la conversión termoquímica de la biomasa. La temperatura de la reacción rige significativamente qué reacción domina. Sin embargo, en la práctica real es difícil mantener perfiles de temperatura uniformes en los reactores de pirólisis; por lo tanto, es muy probable que muchos de los mecanismos de reacción mencionados anteriormente tengan lugar simultáneamente (Kambo & Dutta, 2015).

#### 1.1.4.4.1 Métodos de pirólisis

Aunque el proceso básico de pirólisis, el de calentar una materia prima que contiene C en un entorno de oxígeno limitado, es siempre el mismo, existen diferentes metodologías, según las variaciones en los diferentes parámetros de proceso, a través de las cuales se obtienen productos con diferentes características. Las principales variables que se manipulan son la temperatura de pirólisis y el tiempo de residencia de la materia prima en la unidad de pirólisis (Verheijen et al., 2010).

Dependiendo de la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia del sólido o vapor en la unidad de pirólisis, se puede clasificar en pirólisis lenta y pirólisis rápida. La pirólisis lenta produce biochar a una velocidad de calentamiento baja para una residencia relativamente larga (hasta varios días). Por otro lado, la pirólisis rápida produce biochar a una velocidad de calentamiento alta y a un corto tiempo de residencia. Las principales diferencias entre ambas son los rendimientos de biochar y bio-aceite: la pirólisis rápida favorece el alto rendimiento de bio-aceite mientras que la pirólisis lenta favorece el rendimiento de biochar (Qian et al., 2015).

El contenido de carbono fijo en el biochar suele aumentar con el incremento de la temperatura de pirólisis. Esto es debido a que en la fase inicial de la pirólisis (bajas temperaturas), las materias volátiles se liberan aleatoriamente de la materia prima de la biomasa. Su liberación disminuye el rendimiento del biochar. Un mayor aumento de la temperatura de pirólisis disminuye la liberación de compuestos ricos en carbono, mientras que otros compuestos volátiles continúan liberándose, lo que conduce a un mayor contenido de carbono fijo en el biochar restante. Aparte del rendimiento del biochar y del contenido de carbono fijo, las características de la textura (por ejemplo, la superficie y la distribución del tamaño de los poros) del biochar están influidas por la temperatura de la pirólisis. Por ejemplo, el

aumento de la temperatura de pirólisis da lugar a la liberación de más materia volátil de la superficie de la biomasa, lo que produce un biochar con mayor superficie y más poros (Lee et al., 2019).

Tabla 1.2: Porcentaje productos post-pirólisis resultantes de diferentes temperaturas y tiempos de residencia.

Fuente: (adaptado de Lehmann & Joseph, 2015 )

MÉTODO	CONDICIONES	LÍQUIDO	BIOCHAR	SYNGAS
<b>PIRÓLISIS RÁPIDA</b>	Temperatura moderada (400 °C - 600 °C), cortos períodos de residencia del vapor caliente (<10 s)	40% - 70%	10% - 25%	20% - 40%
<b>PIRÓLISIS LENTA</b>	Rango amplio de temperatura (300 °C – 700 °C), largos períodos de residencia del sólido	0 - 15%	35% - 50%	40% - 75%

Además de las diferentes condiciones de pirólisis, la escala a la que se realiza este proceso también puede variar mucho. Según lo expuesto por Verheijen et al. (2010), se pueden diferenciar dos escenarios: "Cerrado" y "Abierto". Cerrado se refiere al escenario en el que se utilizan unidades de pirólisis relativamente pequeñas, posiblemente incluso móviles, con residuos de cultivos y otros desechos biológicos que se pirolizan en el sitio y se agregan de nuevo a los suelos cercanos. Abierto hace referencia a plantas de pirólisis a escala industrial, donde la materia prima debe trasladarse hasta estas unidades y el producto finales también tiene que ser redistribuido.

Parte de los productos finales como el syngas pueden ser recirculados en la unidad de pirólisis y así proporcionar energía para los ciclos de pirólisis subsiguientes. Además, los subproductos líquidos pueden ser recuperados para la producción de ácidos orgánicos y biocombustibles (Kambo & Dutta, 2015) . Por lo cual la eficiencia general del proceso, tanto en términos de combustible, como de costos de emisión de carbono, pueden ser minimizados (Verheijen et al., 2010).

En la Tabla 1.3 se presenta una síntesis de los diferentes procesos de obtención de biochar en función de las condiciones de procesos y los rendimientos obtenidos.

Tabla 1.3: Clasificación de los diferentes tratamientos termoquímicos en función de las condiciones de proceso y el rendimiento de biochar.

Fuente: (adaptado de Lee et al., 2019).

PROCESO	Temperatura de operación (°C)	Tasa de calentamiento (°C/min)	Tiempo de Residencia	Rendimiento de Biochar (% peso)
<b>TORREFACCIÓN SECA</b>	200 - 300	10-15	30 min – 4 h	60 - 80
<b>GASIFICACIÓN</b>	600 – 1200	50 – 100 (°C/s)	10 – 20 s	< 10
<b>HTC</b>	180 – 260	5 – 10	5 min – 12 h	45 -70
<b>PIRÓLISIS LENTA</b>	300 – 800	5 – 7	>1 h	35 - 50
<b>PIRÓLISIS RÁPIDA</b>	400 - 600	300 – 800	0,5 – 10 s	10 - 25

### 1.1.5 Materias Primas

En principio, cualquier materia orgánica puede ser pirolizada y de esta manera producir biochar, sin embargo, el rendimiento varía considerablemente de una materia prima a otra. Ésta es, junto con las condiciones de pirólisis, el factor más importante que controla las propiedades del biochar resultante. En primer lugar, la composición química y estructural de la materia prima se relaciona con la composición química y estructural del biochar obtenido y, por lo tanto, se refleja en su comportamiento, función y destino en los suelos. En segundo lugar, el alcance de las alteraciones físicas y químicas sufridas por la biomasa durante la pirólisis dependen de las condiciones de procesamiento.

Como consecuencia de ello, se han propuesto muchos tipos de biomasa diferentes como materias primas para el biochar, entre ellos la madera, las cáscaras de granos, las cáscaras de nueces y los residuos de cultivos, algunos de ellos utilizados también actualmente para la producción de carbón activo. Además, se ha analizado el empleo de otros tipos de materias primas potencialmente disponibles, entre las que se destacan los desechos biológicos (por ejemplo, lodos de depuradora o desechos municipales) y el compost. No obstante, el uso de esas materias primas entraña un riesgo, vinculado en su mayor parte a la presencia de componentes peligrosos, por ejemplo, contaminantes orgánicos y metales pesados (Verheijen et al., 2010).

La humedad de la materia prima es otro parámetro importante a la hora de producir biochar porque la selección del método de pretratamiento y su viabilidad depende en gran medida del tipo de materia prima (húmeda o seca). Una biomasa recién cosechada, como residuos vegetales, lodos de depuración, residuos animales, algas, etc., tiene generalmente un alto contenido de humedad (>30%) y, por lo tanto, se la denomina biomasa húmeda. Éstas pueden secarse hasta obtener una materia prima de bajo contenido de humedad con técnicas de secado suplementario; sin embargo, esas técnicas son muy intensivas en energía y pueden reducir la eficiencia económica general del sistema. Por otro lado, biomasa como los residuos agrícolas y pocas especies madereras suelen tener un bajo contenido de humedad (<30%) en el momento de la cosecha y, por lo tanto, se la clasifica como biomasa seca (Kambo & Dutta, 2015).

#### 1.1.5.1 Biomasa lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica es la materia seca vegetal no comestible más abundante, compuesta principalmente de desechos forestales y agrícolas, como astillas de madera, paja de arroz y bagazo de caña de azúcar (Wang et al., 2017). Al ser uno de los materiales disponibles más abundantes en la naturaleza es una elección adecuada para ser utilizada como materia prima para la producción de biochar.

En la Figura 1.6 se muestran los tres componentes principales de esta biomasa vegetal: la hemicelulosa, la celulosa y la lignina las cuales comprenden, generalmente, 15-30%, 40-60% y 10-25% en peso respectivamente (Wang et al., 2017). Esta variación entre los tres componentes principales le confiere a cada tipo de biomasa una energía interna y estabilidad térmica determinada. La hemicelulosa se degrada térmicamente con relativa facilidad en comparación con los otros componentes (Lee et al., 2019). La celulosa y la lignina sufren una degradación térmica a temperaturas que oscilan entre 240-350°C y 280-500°C, respectivamente. Por lo tanto, la proporción relativa de cada componente determinará la medida en que la estructura de la biomasa es retenida durante la pirólisis, a cualquier temperatura dada. Debido a la mayor estabilidad térmica de la lignina, la biomasa con un alto contenido en lignina (por ejemplo, cáscaras de olivo) produce algunos de los mayores rendimientos de biochar (Verheijen et al., 2010).

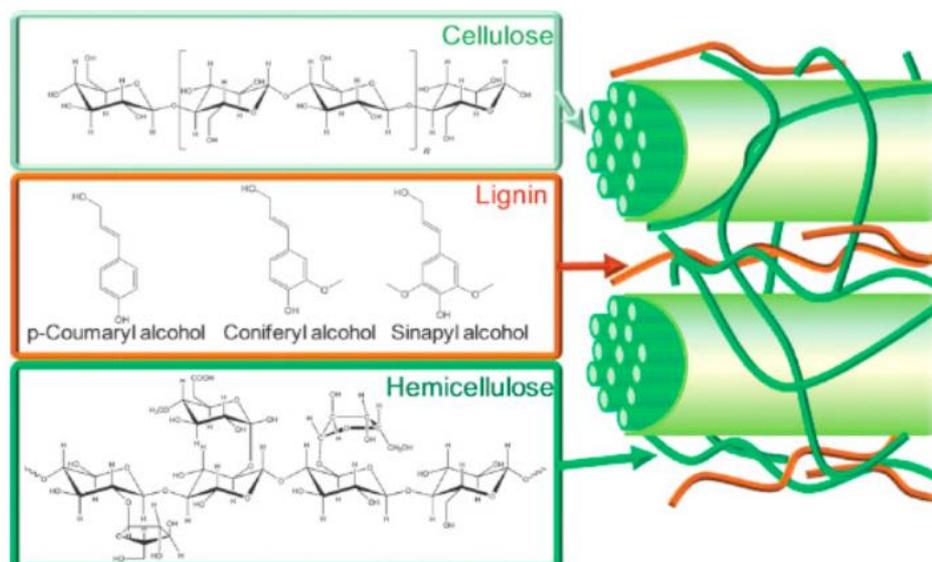


Figura 1.6: Componentes principales de la biomasa lignocelulósica.

Fuente: (Wang et al., 2017)

Otro componente a considerar en la elección de las materias primas es el contenido de cenizas, ya que el contenido mineral de la materia prima se retiene en gran medida en el biochar resultante, donde se concentra debido a la pérdida gradual de carbono, hidrógeno y oxígeno durante el proceso de pirólisis. Mientras que la materia prima leñosa contiene generalmente proporciones bajas (< 1% en peso) de ceniza, la biomasa con altos contenidos minerales como las cáscaras de los granos y los residuos de paja producen generalmente un biochar rico en cenizas (Verheijen et al., 2010). La Tabla 1.4, expuesta por Verheijen y otros (2010) en su revisión científica, proporciona un resumen de algunos de los componentes clave en materias primas representativas para la producción de biochar.

Tabla 1.4: Componentes claves (% en peso) de diferentes materias primas para producción de biochar.

Fuente: (Verheijen et al. 2010)

	<b>CENIZAS</b>	<b>LIGNINA</b>	<b>CELULOSA</b>
<b>PAJA DE TRIGO</b>	11,2	14	38
<b>RESIDUO DE MAIZ</b>	2,8-6,8	15	39
<b>HIERBA</b>	6	18	32
<b>MADERA (ÁLAMO, SAUCE, ROBLE)</b>	0,27-1	26-30	38-45

Es necesario analizar además la capacidad que tienen ciertas especies vegetales de bioacumular algunos metales, o en el caso de los residuos de cultivos, la posibilidad de contener concentraciones importantes de herbicidas, plaguicidas, fungicidas. Una temperatura de reacción muy elevada y altas tasas de calentamiento pueden destruir la estructura porosa fina y pueden causar la devolatilización/condensación de la materia orgánica volátil en la estructura porosa del biocarbón, así como la fusión de componentes metálicos alcalinos y alcalinotérreos en ella. Estos mecanismos dan lugar a la obstrucción de los poros y a la reducción de la superficie total del biocarbón, alterando su porosidad y propiedades (Kambo & Dutta, 2015).

Se debe tener en cuenta que, incluso dentro de un tipo de materia prima de biomasa específica, la

composición puede ser diferente debido a las distintas condiciones ambientales de cultivo (por ejemplo, el tipo de suelo, la temperatura y el contenido de humedad) y las relacionadas con el momento de la cosecha, lo cual puede tener influencias en las características del producto final. Además, la disponibilidad de las distintas materias primas en un lugar y momento determinado condicionará la disponibilidad de biochars específicos y en su valor económico dependiendo de las características requeridas.

### 1.1.5.2 Producción a partir de residuos algodoneiros

Los residuos de la producción de algodón son materiales lignocelulósicos con poco valor económico. Los que generan tras la cosecha, principalmente tallos, se incorpora al suelo como mantillo, se incineran directamente en las tierras de cultivo para restringir futuras infestaciones de plagas o se retiran de las tierras de cultivo sin un destino específico. Los residuos que se generan en el desmote, una mezcla de pequeños pedazos de tallo, ramas, cascarilla y fibrilla, tampoco tienen un destino definido y muchas veces son usados como combustible en cocinas sencillas o como alimento animal. Estos residuos presentan bajo contenido de humedad, en el orden del 8%. En la Tabla 1.5, se muestra los parámetros claves para la producción de biochar en la composición química de residuos del desmote de algodón (Piccioni et al., 2012).

Tabla 1.5: Componentes claves (% en peso) en residuos de desmote para producción de biochar.

Fuente: (Piccioni et al., 2012)

	<b>CENIZAS</b>	<b>LIGNINA</b>	<b>CELULOSA</b>
<b>RESIDUOS DE DESMOTE</b>	10,2	17	35

En los últimos años, numerosos estudios se han centrado en la utilización de los desechos de algodón como materia prima para la producción de carbón vegetal con fines energéticos (Al Afif et al., 2020; Allesina et al., 2018; Bela, 2017). Sin embargo, por sus características, los mismos podrían ser utilizados para la producción de biochar como enmienda para suelos.

## 1.2 El Algodón

El algodón es la fibra textil natural más utilizada en todo el mundo. Es cultivado principalmente para la obtención de fibras, aunque también destaca como fuente de productos oleaginosos y alimenticios (Paytas & Ploschuk, 2013). Este cultivo y las industrias textiles asociadas a él son fundamentales para el crecimiento económico de países desarrollados y en vía de desarrollo. La gran área bajo cultivo de algodón lo convierte en uno de los cultivos más importantes en términos de uso de tierra después de los granos alimenticios y la soja (FAO & ICAC, 2015)

### 1.2.1 Características generales

El algodón es una planta con flor perteneciente al orden Malvales, a la familia de las Malváceas, a la tribu *Gossypieae* y al género *Gossypium*. Dentro de este género, existen actualmente treinta y tres especies reconocidas, de las cuales solo cuatro han sido domesticadas con interés comercial. Entre ellas se destaca la especie *G. hirsutum*, desarrollada en Estados Unidos a partir del algodón nativo de México y de América Central, la cual incluye la mayoría de las variedades comerciales de algodón de fibra corta, constituyendo aproximadamente el 90% del algodón bruto producido en el mundo (Paytas & Ploschuk, 2013).

En cuanto a las características morfológicas, la raíz principal es axonomorfa o pivotante, las secundarias siguen una dirección más o menos horizontal. Posee hojas pecioladas, de un color verde intenso, grandes, con los márgenes lobulados y provistas de brácteas. Las flores son dialipétalas, grandes, solitarias y penduladas. El cáliz de la flor está protegido por tres brácteas. La corola está formada por un haz de estambres que rodean el pistilo. El fruto es una cápsula en forma ovoide; con tres a cinco carpelos, que tiene seis a diez semillas cada uno. Las células epidérmicas de las semillas constituyen la fibra llamada algodón. La longitud de la fibra varía entre 20 a 45 cm, y el calibre, entre 15 a 25 micras; con un peso de 4 a 10 gramos. Es de color verde durante su desarrollo y oscuro en el proceso de maduración (Sistema Nacional Argentino de Vigilancia y Monitoreo de plagas, 2020).



Figura 1.7: *Gossypium hirsutum*.

Fuente: (Paytas & Ploschuk, 2013)

Naturalmente, la planta de algodón crece en regiones tropicales y subtropicales como planta perenne, es decir, que puede vivir más de dos años, alcanzando el tamaño de un árbol pequeño. Sin embargo, para la producción comercial de materias primas, el algodón se cultiva como planta anual, es decir, el cultivo se cosecha en el mismo año de siembra (Percy et al., 2014). En estos casos, la muerte de esta planta no es una consecuencia natural de la maduración de la semilla, sino debido a la aplicación de productos químicos o la destrucción mecánica.

Las condiciones básicas requeridas para una exitosa producción de algodón incluyen un período libre de heladas y un rango de temperatura de 18–32 °C. El algodón exhibe un cierto grado de tolerancia a la sal y la sequía y, por lo tanto, se cultiva en zonas áridas y regiones semiáridas. Sin embargo, se obtienen calidad de fibra y niveles de rendimiento más altos con sistemas de producción que incorporan riego o suficiente lluvia (FAO & ICAC, 2015).

## 1.2.2 Importancia económica mundial

El algodón es uno de los productos agrícolas de mayor intercambio comercial en todo el mundo. Se produce principalmente para la obtención de su fibra, la cual se emplea como materia prima textil y es, por producción y volumen de comercialización, la fibra vegetal textil más importante (Khan et al., 2020). Además, la semilla de algodón es una importante fuente de aceites vegetales, por lo cual este cultivo también tiene trascendencia desde el punto de vista oleaginoso y alimenticio ya que el residuo de extracción puede utilizarse en la alimentación de animales por su alto contenido en proteínas.

Con una producción total de 24.190.795 toneladas de algodón durante el año 2018 en más de 75 países, la importancia social y económica del algodón a escala mundial es evidente. Alrededor del 80% de todo el algodón es producido en seis países. China es el principal productor mundial, seguido de India, Estados Unidos, Pakistán, Brasil y Turquía (FAOSTAT, 2020). En la Figura 1.8 se muestra la producción de algodón en el mundo durante el año 2018.

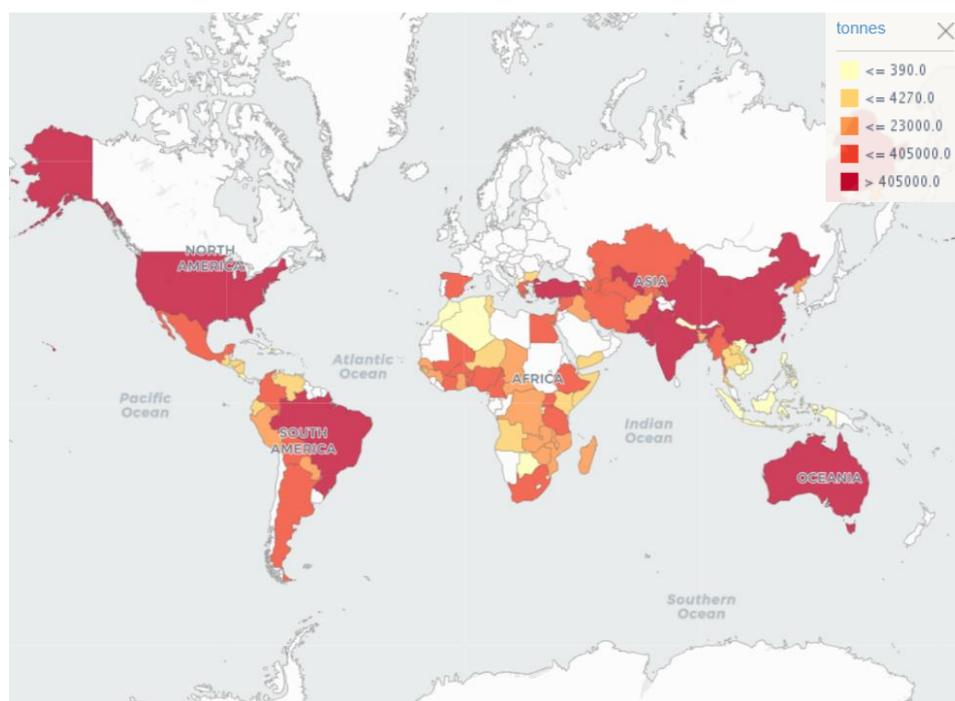


Figura 1.8: Producción de pelusa de algodón por país 2018.

Fuente: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>

El algodón ha desempeñado un papel importante en el desarrollo industrial desde el siglo XVIII y continúa desempeñando un papel central hoy en día como fuente principal de ingresos, siendo fundamental para el crecimiento económico tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo. La gran superficie de cultivo de algodón lo convierte en uno de los cultivos más importantes en términos de uso de la tierra después de los granos alimenticios. Más de 250 millones de personas están involucradas en el sector del algodón considerando la producción directa, así como el personal involucrado en los servicios auxiliares como transporte, desmotado, empaclado y almacenamiento. Además, la industria algodonera también proporciona empleo indirecto a varios millones de personas a través de trabajos relacionados con la producción (FAO & ICAC, 2015).

## 1.3 Producción de algodón en Argentina

### 1.3.1 Importancia económica en Argentina

El cultivo de algodón se inició en Argentina en tiempos de la conquista, siendo una de las principales actividades agrícolas de las primeras colonias (Delssin, 2013). A lo largo de la historia, la evolución de la actividad en el país estuvo influenciada por el contexto internacional.

En el año 1923 se produjo una crisis algodonera internacional y fue a partir de ese año cuando la producción de algodón en Argentina se incrementó drásticamente, consiguiendo no sólo abastecer el mercado interno, sino contemplar salidas exportadoras. Esta expansión fue facilitada por la actividad conjunta de grupos extranjeros y locales, quienes trabajaban junto a los productores (Guy, 2000). A partir de entonces, la producción de algodón y las actividades asociadas a este cultivo posibilitaron el asentamiento de la población a nivel urbano y rural en el noroeste argentino, generando un crecimiento económico sostenido a partir de esta actividad económica la cual se extendió después al noreste del país.

A lo largo del siglo XX y XXI, las tendencias en la producción han variado significativamente en las diferentes décadas. La evolución tecnológica, que se aceleró a partir de 1990 con la mecanización de las labores agrícolas, nuevos productos químicos y estrategias para el control de plagas, así como la irrupción de la biotecnología con los organismos genéticamente modificados (OGM), permitieron alcanzar un récord histórico de producción en la campaña de 1997/98 (Delssin, 2013). A partir de ese momento comenzó un periodo de disminución acelerada en la producción de algodón, generada por diversos motivos que desalentaron la actividad, entre los que se pueden citar: precios desfavorables, competencia con la soja por las áreas de cultivo y condiciones ambientales adversas (Paytas & Ploschuk, 2013).

En los últimos años se produjo una posterior recuperación de las áreas sembradas, fomentada por una mejora en los precios internacionales y por la implementación de una tecnología de cultivo y cosecha innovadora, que actuó como un fuerte factor impulsor, disminuyendo la brecha tecnológica del algodón respecto a la soja (Delssin, 2013).

En la Tabla 1.6 se presenta un resumen de la producción de algodón en Argentina durante las tres últimas campañas en base a datos de SISA (Sistema de Información simplificado Agrícola).

Tabla 1.6: Producción de algodón en Argentina de las últimas tres campañas.

Fuente: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe\\_algodon18\\_19.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe_algodon18_19.pdf)

<b>CAMPAÑA</b>	<b>SUP. SEMBRADA (ha)</b>	<b>PRODUCCIÓN (t)</b>	<b>PRODUCTIVIDAD (t/ha)</b>
<b>2016/17</b>	253.310	616.160	2,55
<b>2017/18</b>	327.465	813.692	2,55
<b>2018/19</b>	298.950	876.000	2,93

### 1.3.2 Estructura de la cadena de valor

La cadena algodonera-textil se compone de una fase primaria de producción de algodón y una fase industrial que se subdivide en tres segmentos: la producción de fibra, los manufacturados textiles y por último el segmento de confecciones e indumentaria. A continuación, en la Figura 1.9 se representa un esquema de la cadena de valor completa, sin embargo, el presente trabajo solo se centrará en la

descripción de las dos primeras fases, correspondientes a la obtención de materias primas y a la primera industrialización.

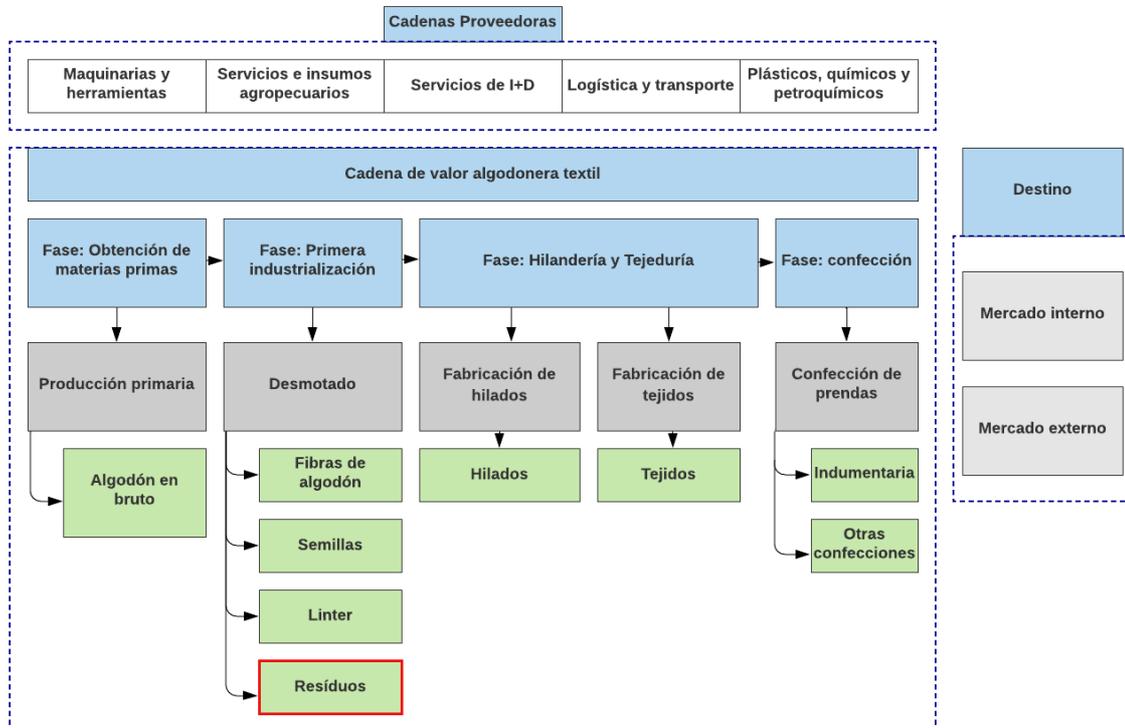


Figura 1.9: Cadena de valor algodонера-textil en Argentina.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Informe de Cadena de Valor Algodonera -Textil, 2017)

### 1.3.2.1 Producción primaria

En la fase de obtención de materias primas, la actividad se inicia con la producción de algodón en bruto, el cual una vez cosechado se lo envía a la desmotadora. En esta etapa, se lleva a cabo la separación de la fibra de la semilla. El principal producto del desmote es la fibra de algodón.

En la etapa de la producción primaria participan distintos sistemas productivos, según el tamaño de los productores:

- Grandes productores: conformado por aquellos que poseen más de 100 hectáreas sembradas, representa el 3% de los productores y explican el 26% de la superficie algodонера.
- Medianos productores: con una superficie agrícola entre 50 a 100 hectáreas, concentran el 4% de los productores y ocupan el 29% de la superficie.
- Pequeños productores: se encuentran en el estrato que varía entre 10 y 50 hectáreas, son el 10% del total con el 25% de la superficie sembrada.
- Productores Minifundistas: no superan las 10 hectáreas de superficie agrícola, y representan el 82% de los productores y el 20% de la superficie sembrada.

La siembra de algodón admite dos diferentes métodos: la siembra en surcos estrechos y el método convencional que permite la siembra directa. En lo que respecta a la cosecha, en Argentina se emplean diferentes métodos, el más utilizado es la cosecha mecánica con diferentes niveles tecnológicos. En el otro extremo se posiciona la cosecha manual, con uso intensivo de mano de obra, la cual se presenta como única opción en las pequeñas explotaciones familiares, pero actualmente tiene una participación mínima en el sistema productivo.

### 1.3.2.2 Desmotado

El sector desmotador presenta una mayor concentración que el primario, y, a pesar de no ser una actividad de capital intensiva, la necesidad de financiar los stocks de fibra que se acumulan en determinados períodos del año motiva cierto nivel de concentración empresarial.

De acuerdo con las distintas series estadísticas existentes en la Argentina, se observa que, para acompañar los procesos de producción del cultivo, se han ido instalando plantas desmotadoras a lo largo de las diferentes décadas. Como se puede observar en la Figura 1.10, en los años de 1990 a 1999 se logra el máximo de incorporación, sin embargo, en los años posteriores (2000/2010) decrece y solamente se instalaron 9 plantas.

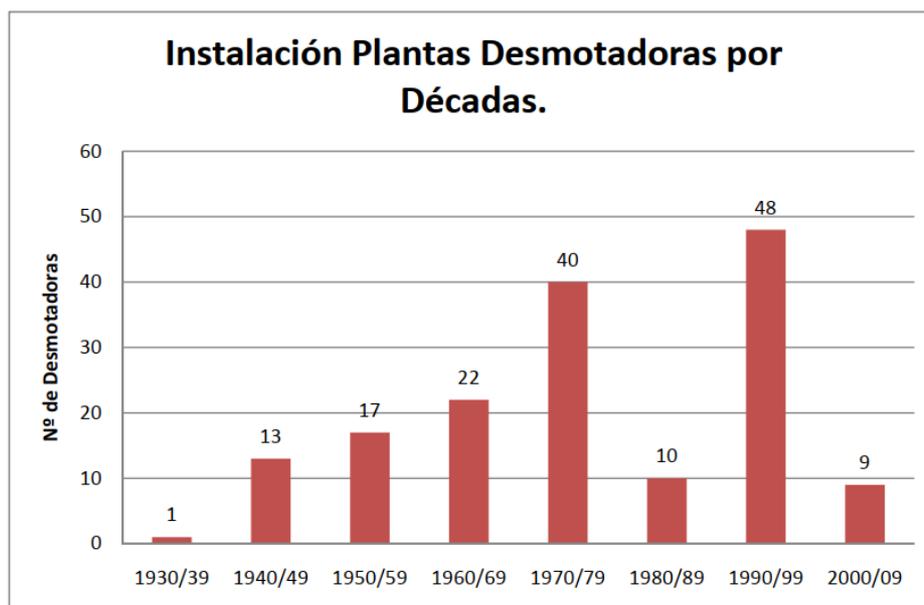


Figura 1.10: Plantas desmotadoras instaladas por décadas.

Fuente: (Villalba, 2010)

A lo largo de la serie histórica el número de desmotadoras ha ido aumentando hasta llegar a un máximo de 160 plantas instaladas en la década de 2000. Sin embargo, en los años siguientes se produjo una disminución del parque desmotador, reduciéndose a sólo 72 plantas que operaron en el año 2010 (Villalba, 2010).

Estos establecimientos desmotadores pueden clasificarse en tres grandes grupos según su capacidad de procesamiento: los de baja capacidad (hasta 200 t/día), son desmotadoras convencionales, de mayor antigüedad, que actualmente suplen algunas demandas específicas del sector y dan cuenta del 40% del desmote total. Los de capacidad media (entre 201 y 400 tn/día), surgen antes de los años 90 y no poseen tecnología de avanzada. Representan el 38% de la capacidad de desmote. Las plantas de alta producción (más de 400 t/día) datan de la década del 90 y cuentan con una tecnología e infraestructura de avanzada, conformando el 22% del desmote total (Informe de Cadena de Valor Algodonera -Textil, 2017).

### 1.3.3 Localización territorial

La región algodонера argentina, se encuentra distribuida en una amplia zona al norte de los 30° de Latitud Sur, identificada por una gran variabilidad de suelos y climas. En rasgos generales se caracteriza por una marcada alternancia periódica de excesos y déficit hídricos, aliviada con años de buena distribución de precipitaciones que cubren las necesidades de agua para el desarrollo de los cultivos; en años adversos, cuenta con la posibilidad del uso adicional del agua superficial de cauces naturales permanentes y estacionales, agua subterránea, embalses y represas, que pueden

complementar los requerimientos.

Aunque el algodón se cultiva mayoritariamente en condiciones de secano (sin riego), existen zonas algodoneras definidas por condiciones agrohidrológicas de riego como Córdoba, parte de Santiago del Estero, parte de Formosa y Salta. Como se muestra en la Figura 1.11, la siembra se realiza entre los meses de septiembre y octubre y la cosecha desde febrero del siguiente año hasta julio, dependiendo de la provincia.



Figura 1.11: Fechas de siembra y cosecha.

Fuente: Elaboración propia a partir de (*Informe de Cadena de Valor Algodonera -Textil, 2017*)

La provincia del Chaco ha representado históricamente el área de mayor producción, con una participación relativa que ha oscilado entre el 40% y el 70% del total. Le sigue Santiago del Estero, que en la década del 90 se convirtió en la segunda provincia productora del país. Las restantes son Santa Fe, Salta, Formosa, seguidas por San Luis, Entre Ríos, Corrientes y Córdoba.

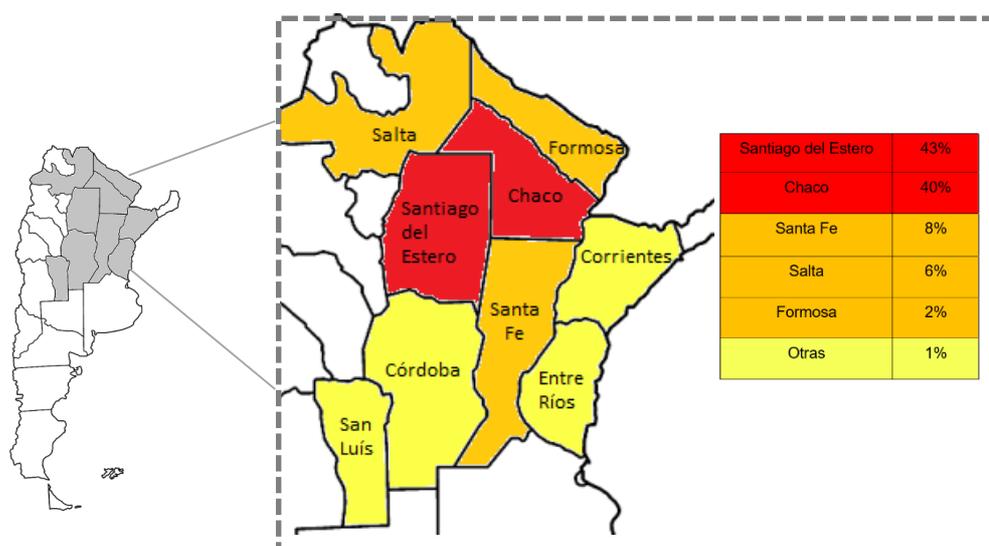


Figura 1.12: Localización territorial de la producción de algodón en Argentina (2015-2016).

Fuente: Elaboración propia a partir de (*Informe de Cadena de Valor Algodonera -Textil, 2017*)

En lo que respecta a las plantas desmotadoras, el 89% se encuentran localizadas en la zona de producción primaria, mayormente en Chaco, Santiago del Estero y Santa Fe (*Informe de Cadena de Valor Algodonera -Textil, 2017*).

### 1.3.4 Productos

El objetivo principal de la producción de algodón es la obtención de fibra, la cual es utilizada principalmente como materia prima para la fabricación de tejidos y prendas de vestir. Debido a su

versatilidad y popularidad, la fibra de algodón tiene innumerables usos además de los antes mencionados, entre los que se pueden destacar la fabricación de insumos médicos como gasas y vendajes, usos cosméticos y en la industria para la producción de lonas, cauchos, hilos industriales entre otros.

### 1.3.5 Subproductos

Si bien la fibra es el producto principal por el cual se desarrolla la cadena agroindustrial del algodón, durante este proceso se generan otros subproductos que poseen múltiples usos.

Luego de su cosecha, el algodón en bruto es procesado para separar la fibra de la semilla. De este proceso se obtiene, además del producto principal (fibra), las semillas y el linter.

La cáscara de la semilla se emplea en la fabricación de pellets para la alimentación animal, mientras que el núcleo presenta el mayor potencial, ya que de allí se obtiene aceite y harina (Paytas & Ploschuk, 2013).

El linter es una fuente de celulosa muy importante, está conformado por las fibrillas que quedan luego del desmotado y es un material más limpio que la fibra, es por ello que es removido de la semilla y empacado como si fuera un fardo de algodón para su posterior utilización como algodón hidrófilo.

Un problema importante que presentan las semillas de algodón es la presencia de gosipol, que puede causar algunos inconvenientes si se consume en altas proporciones. Éste es un pigmento amarillo polifenólico que se encuentra en la semilla en forma libre y que reduce la concentración de hemoglobina en plasma y, en casos extremos, puede provocar dificultades respiratorias, insuficiencia circulatoria y la muerte del animal cuando es empleado para su alimentación. El nivel de gosipol libre disminuye en la harina con respecto a la semilla, ya que en parte se extrae con el aceite y en parte forma complejos indigestibles con aminoácidos, especialmente lisina, como resultado del procesado térmico (*Semilla de algodón* | FEDNA, s. f.).

La torta de algodón, obtenida después de la extracción de aceite, es empleada actualmente en la elaboración de piensos, debido a su alto valor proteico. Sin embargo, el alto contenido de grasa (20%) y la presencia de gosipol (1, 2 a 1,4%) impone limitaciones en el uso de la torta de algodón en alimentos para animales, por lo que debe administrarse con precaución ya que existe una tolerancia diaria (Primaz, 2018).

### 1.3.6 Residuos

Durante el proceso de desmotado se producen una gran cantidad de residuos biomásicos, compuestos por fibrilla, cascarillas, penachos, carpelos, y materias extrañas que se encontraban presentes en el algodón en bruto.

El porcentaje de residuos generados ronda valores del 15% al 30% del algodón en bruto teniendo en cuenta varios aspectos como: variedades de algodón, estado y manejo del cultivo, tipo de cosecha entre otros. Por lo que, potencialmente se tendría disponible varios miles de toneladas de residuos por campañas (Bela, 2017).

Estos residuos representan un serio inconveniente para las plantas desmotadoras, que anualmente generan gran cantidad de desechos sin destino final identificado en Argentina. La variabilidad de la producción anual de algodón, la dispersión geográfica de las desmotadoras y los costos de transporte, dificultan proponer alternativas de reutilización de alta complejidad (Argento et al., 2018).

# 2 OBJETIVOS Y ALCANCE

---

## 2.1 Objetivo general

Contribuir a la sostenibilidad del cultivo de algodón en Argentina a través del aprovechamiento del residuo de desmote para la producción de biochar, para su posterior utilización como enmienda orgánica para suelos y como sumidero de carbono.

## 2.2 Objetivos específicos

- Comprender el sistema de producción de algodón en Argentina.
- Conocer las características de los residuos de desmote y su influencia sobre las propiedades del biochar que se podría generar a partir de éstos.
- Conocer los procesos de producción de biochar que permitan la obtención de un producto apto para su utilización como enmienda orgánica, los parámetros que influyen sobre la obtención del producto final, así como los rendimientos esperados.
- Establecer los parámetros requeridos para que el biochar producido pueda ser aplicado para la mejora en la productividad del suelo.

## 2.3 Alcance

El presente trabajo se construye en base a información bibliográfica recaba de diferentes estudios previos y no se desarrolla un trabajo experimental.

Mediante el análisis bibliográfico y la simulación de procesos de producción se busca definir las condiciones y características necesarias para maximizar la producción de biochar apto para su aplicación en el suelo a partir de residuos de desmote de algodón, y así poder sentar bases para futuros estudios experimentales.

En este estudio sólo se considera como destino final de la producción de biochar su utilización como enmienda orgánica, dejando de lado otros posibles usos como ser carbón activo o combustible.

Queda excluido el análisis económico asociado a la propuesta.



# 3 CASO DE ESTUDIO

---

Para el presente estudio se decidió acotar el área geográfica de producción de algodón en Argentina, centrándose en las provincias de Santiago del Estero y Chaco, debido a que en conjunto representan más del 80 % de la producción algodonera en Argentina (*Informe de Cadena de Valor Algodonera -Textil*, 2017).

Además del factor antes mencionado, la selección del área se debe a que ambas provincias se ven afectadas por serios problemas ambientales entre los que se destacan:

- La deforestación desmedida de los bosques autóctonos para extracción de madera.
- La expansión de la frontera agrícola por la cual se sustituye la vegetación nativa original por diferentes cultivos agrícolas, principalmente soja.
- Sustitución de vegetación nativa por cultivos de pasturas para el ganado.
- Incendios intencionados como práctica (ilegal) para favorecer el rebrote, eliminación de desechos, transformación de terrenos boscosos en áreas agrícolas.

Todos ellos repercuten directamente en las propiedades de los suelos, provocando erosión del suelo, pérdida de nutrientes y cambio de estructura, salinización, desertificación, compactación y alteración microbiológica (Bachmann et al., 2007). Por estos motivos, el biochar podría ser empleado como enmienda para suelos en la zona señalada para así contribuir a la mejora de las propiedades alteradas.

En el presente capítulo se detallan, en primer lugar, las características de los procesos de producción primaria y el desmote dentro del área geográfica seleccionada con el fin de comprender de dónde proceden los residuos de la producción de algodón, así como también los volúmenes de producción de los residuos de desmote y el marco normativo que los contempla.

Posteriormente, se hace una caracterización de los residuos de desmote en base a información bibliográfica, analizando la influencia que tienen dichas características en el biochar que se puede obtener tras los procesos de producción, lo que puede servir como base para futuros estudios experimentales.

En base a la bibliografía consultada, se hace la selección entre distintos procesos termoquímicos para la producción de biochar, con el objetivo de determinar cuál es el óptimo para maximizar la obtención de biochar y favorecer la obtención de las características deseadas para el mismo.

A partir del balance de materia y energía, se busca estimar la cantidad de producto que se puede obtener en el proceso y la energía que se requiere para el mismo. A continuación, y en base a las características de la materia prima y de proceso y a los lineamientos marcados por *The European Biochar Certificate*, se describen las características esperadas para que el biochar pueda ser utilizado como enmienda orgánica.

Por último, se exponen los factores a tomar en consideración para la implementación de la producción de biochar a partir de RDD según el proceso y las características del entorno previamente analizadas, así como los retos y oportunidades detectados.

### 3.1 Producción primaria de algodón

Históricamente, en Argentina, el algodón se sembraba únicamente empleando sistemas de cultivo de baja, con una distancia entre surcos de 0,9 a 1,0 m, obteniéndose plantas de mayor tamaño y ciclos más

largos. En este sistema de siembra, la cosecha era de tipo manual o mecanizada con cosechadoras “picker” o con “púas”, adaptadas específicamente para estas distancias entre surcos. Sin embargo, en los últimos años, con el objetivo de aumentar los rendimientos y la reducción de los costos de producción, se comenzó a expandir el sistema de surcos estrechos (0,38-0,52 m) y altas densidades. (Paytas & Ploschuk, 2013).

La tecnología denominada de surcos estrechos implica el acercamiento de la distancia entre líneas de cultivo, pasando de 1 m, a distancias de 50 cm o menores. Esta modificación requiere adecuación de las cosechadoras pasando del sistema picker al stripper, las cuales poseen una plataforma regulable en altura, integrada por punzones que peinan y arrancan las cápsulas. Además, el sistema de surcos estrechos introdujo cambios en el manejo del cultivo entre los que se incluyen control químico de malezas, regulación de crecimiento más estricto y mayor uso de agroquímicos (Simon, 2012). Se estima que la adopción de esta tecnología ocupa el 64% de la producción de algodón.



Figura 3.1: Cosechadora con sistema stripper.

Fuente: <https://inta.gob.ar>

La incorporación de los sistemas de cosecha stripper (ver Fig. 3.1.), arrastran un mayor porcentaje de impurezas junto con el algodón cosechado. Por este motivo, las desmotadoras han tenido que adaptarse, mediante la incorporación de sistemas limpiadores combinados en el desmote para la extracción de palos y carpelos y extractores de hojas e impurezas finas (Paytas & Ploschuk, 2013).

Una vez finalizada la cosecha, el Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA) exige a los productores que se proceda a la destrucción de los rastrojos generados. El principal objetivo de esta práctica es evitar la supervivencia y reproducción de la plaga del picudo del algodnero (*Anthonomus grandis Boheman*). Ésta es considerada una de las plagas más destructivas de la agricultura a nivel mundial debido a que incide sobre la producción por la destrucción, principalmente, de botones florales impidiendo la floración y fructificación, provocando grandes pérdidas económicas. Mediante esta medida fitosanitaria, se evita un rebrote del cultivo, impidiendo la proliferación del insecto que aprovecha los restos del cultivo para alimentarse, esconderse y sobrevivir hasta la próxima campaña algodnora (Senasa, 2018).

Para este procedimiento, la destrucción de los rastrojos se realiza con máquinas desmalezadoras o rolos trituradores con la posterior aplicación de insecticidas y plaguicidas. Las raíces de las plantas cortadas permanecen bajo el suelo, descomponiéndose y convirtiéndose en fuente de materia orgánica. Los

rastreros se dejan sobre la superficie del suelo ya que mejoran las condiciones físicas del mismo en diferentes aspectos como ser: mejora en la captación y retención de agua; reducción de la erosión eólica e hídrica; disminución de la temperatura del suelo; disminución de la evaporación de agua y reducción en la susceptibilidad a la compactación favoreciendo la resiliencia del sistema; disminución de la presencia de malezas y, en consecuencia, del uso de herbicidas (Álvarez et al., 2012). Es decir que no se producen residuos orgánicos durante la producción primaria de algodón.

## 3.2 Desmote

Una vez cosechado, el algodón en bruto se trasvasa a un transportador para luego ser descargado en un modulador para su compactación. El traslado de los módulos hacia las desmotadoras se puede hacer de varias maneras: directamente por los productores a desmotadoras privadas o del sector cooperativo, indirectamente a través de acopiadores independientes, ligados a sectores proveedores de insumos u otros acopiadores que realizan compras en campo de productores por cuenta y orden de empresas y/o desmotadoras (Elena et al., 2008).

Como se describió anteriormente, la función principal de la desmotadora de algodón es separar la fibra de la semilla, pero además debe estar equipada para remover materias extrañas (por ejemplo, arena o piedras), humedad, y otros contaminantes que reducen significativamente el valor comercial de la fibra.

Si bien en el país cada planta desmotadora cuenta con distintos tipos de equipamientos y niveles tecnológicos diferentes, a continuación, se hace una breve descripción de las distintas etapas en el proceso de desmote en una planta adaptada a la cosecha stripper, con el fin de identificar en qué parte del proceso se generan los residuos del desmote (RDD).

### 1. *Acondicionamiento y limpieza del algodón en bruto*

Para algodón cosechado de forma mecánica, dado que contiene mayor cantidad de impurezas, las desmotadoras están provistas de dos etapas de secado y pre-limpieza.

Cuando el algodón ingresa a la planta, primero pasa a una torre de secado, para quitarle el exceso de humedad. Desde la torre, el algodón es transportado mediante una corriente de aire caliente a un limpiador, que utiliza cilindros con púas para transportar el algodón a través de una estructura de barrales, removiendo impurezas pequeñas y abriendo más el algodón. En este punto, además, a partir de una corriente de aire caliente, se produce la separación del algodón del aire cargado de impurezas y humedad que es eliminado en el sistema de descarga. El segundo limpiador del primer sistema de pre-limpieza es un limpiador del tipo extractor, en el cual el algodón es alimentado por gravedad sobre cilindros de sierrillas. Estos limpiadores están diseñados para remover del algodón palos, hojas y otras impurezas pesadas. Además, rompen las madejas más gruesas y acondicionan el algodón para una nueva fase de limpieza y secado. Posteriormente, si el contenido de humedad sigue siendo alto, el algodón es sometido nuevamente a un segundo secado.

En la segunda prelimpieza, el algodón es alimentado a un limpiador por aire caliente montado sobre un limpiador de cilindros con púas y alimentado por gravedad. El limpiador por aire caliente sirve a los mismos propósitos que en la primera etapa, mientras que el limpiador de cilindros remueve perillas, palos, tallos, hojas y pasto usando una rejilla más abierta que permite el paso de una pequeña cantidad de algodón bueno junto con basura fibrosa. Este algodón bueno es recuperado mediante un cilindro de sierrillas similar al del limpiador por extracción antes que el mismo sea descartado junto con la basura.

### 2. *Desmotado*

Con ayuda de una cinta transportadora y distribuidora, el algodón se distribuye en la plataforma de la desmotadora. El alimentador-extractor situado sobre la plataforma dosifica el algodón para que entre uniformemente a un ritmo controlable y, como función secundaria, lo limpia. La humedad del algodón

en este punto debe ser suficientemente baja como para que sea fácil eliminar la materia extraña en la plataforma de la desmotadora; pero tampoco debe ser demasiado baja (menos del 5 %), ya que provocaría la rotura de las fibras individuales al separarlas de la semilla.

El algodón entra en la plataforma de la desmotadora a través de una descortezadora situada en la parte delantera. Las sierras agarran el algodón y lo tiran a través de varillas espaciadas. Los copos de algodón pasan de las varillas de la descortezadora hasta el fondo de la caja giratoria. El desmotado propiamente dicho, la separación de la fibra y la semilla tiene lugar en la caja giratoria de la plataforma de la desmotadora. La acción del desmotado la realiza un grupo de sierras que giran entre varillas. Los dientes de la sierra pasan entre las varillas en el punto de desmotado, tirando de las fibras y quedando las semillas retenidas, ya que son demasiado gruesas para pasar entre las varillas.

### 3. Limpieza de fibra

Los limpiadores de fibra mejoran la calidad del algodón eliminando la materia extraña más pequeña, la cual puede ser empleada. En algunos casos mejoran el color de un algodón ligeramente manchado mezclándolo transformándolo en blanco.

El algodón ya desmotado se transporta desde la plataforma de la desmotadora mediante tubos hacia los condensadores donde vuelve a formar un bloque. El bloque se saca del tambor del condensador y entra en un limpiador de fibra de sierra. Éste peina las fibras al tiempo que las golpea contra barras transversales despidiendo las impurezas hacia la corriente que las succiona, alejándolas de las sierras.

### 4. Embalaje

El algodón limpio se comprime en balas que se cubren para protegerlas de la contaminación durante el transporte y el almacenamiento. En la mayor parte de las desmotadoras, el algodón se embala en una prensa de "doble caja" donde la borra se compacta primero en una caja de prensar mediante un sistema mecánico o hidráulico; después la caja gira y la fibra se comprime nuevamente.



Figura 3.2: Etapas del proceso de desmote.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Bela, 2015)

Como se puede observar en la Figura 3.2, en donde se resaltan en rojo las etapas donde se generan los residuos, tanto en el acondicionamiento y limpieza del algodón en bruto (primera y segunda prelimpieza) como en el desmotado y posterior limpieza de la fibra se producen residuos que pueden ser empleados para la producción de biochar. Todo este material es almacenado y cubierto en un área apartada de la planta.

### 3.2.1 Ubicación y capacidad de las plantas desmotadoras

Según el último relevamiento realizado en el año 2010 por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, en el marco del Programa de asistencia para el mejoramiento de la calidad de fibra de algodón, de las más de 126 desmotadoras instaladas sólo se encontraban en operación 72 de ellas. Con respecto a la distribución del número de plantas operativas por provincia, la provincia del Chaco posee el mayor número de plantas: 48, mientras que Santiago del Estero cuenta con 9 instalaciones, conformando en conjunto el 79% de la capacidad de desmote del país. En la Figura 3.3, se observa la distribución geográfica de las plantas desmotadoras que están en actividad en Argentina.

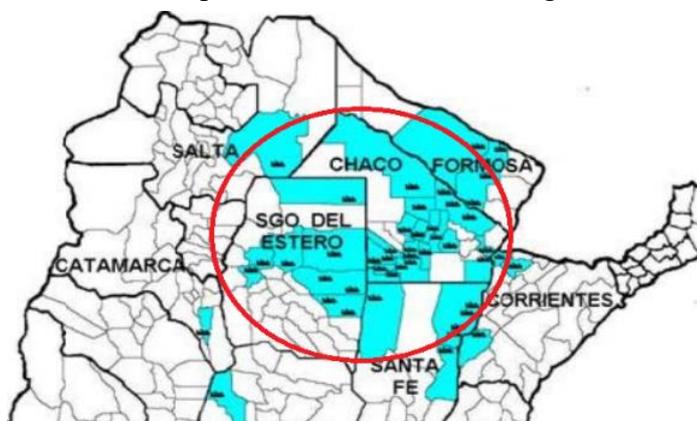


Figura 3.3: Distribución geográfica de plantas desmotadoras.

Fuente: (Villalba, 2010)

En la Tabla 3.1 se detalla la capacidad de desmotado para las plantas que operan en ambas provincias, aunque poseen un promedio general de 204 t/día por desmotadora, dicha capacidad no es ocupada al 100%. Las desmotadoras operan un mínimo de 100 días al año pudiendo ascender hasta 150 días de producción en campañas climáticamente irregulares debido a las demoras en los períodos de cosecha.

Tabla 3.1: Número y capacidad de desmotadoras por provincia.

(Adaptado de Villalba, 2010)

PROVINCIA	NÚMERO DE DESMOTADORAS				CAPACIDAD TOTAL (t/día)	CAPACIDAD PROMEDIO POR DESMOTADORA (t/día)
	Número total	Baja capacidad (hasta 200 t/día)	Media capacidad (200 a 400 t/día)	Alta Capacidad (más de 400 t/día)		
CHACO	48	32	12	4	9005	188
SANTIAGO DEL ESTERO	9	2	7	-	1980	220
<b>TOTAL</b>	<b>57</b>	<b>34</b>	<b>19</b>	<b>4</b>	<b>10 985</b>	<b>-</b>

En la provincia del Chaco, de las 48 desmotadoras en funcionamiento, 14 pertenecen a cooperativas formadas por grupos de pequeños y medianos productores. Las mismas constituyen un eslabón importante para el financiamiento de las campañas ya que, además de encargarse del acopio y desmote, tienen trascendencia en la economía como entidades estratégicas para el desarrollo provincial por su contribución a la creación de empleo y al progreso económico y social de las localidades donde se encuentran. En Santiago del Estero sólo existe una cooperativa, el resto corresponde a empresas particulares.

### 3.2.2 Generación y disposición de residuos del desmote

El volumen de RDD es directamente proporcional al volumen de algodón en bruto que se procese en la desmotadora, rondando valores del 15% al 30% de éste (Bela, 2017). En promedio, como se puede observar en el Figura 3.4, la extracción de materias extrañas representada por los distintos tipos de restos vegetales del cultivo (tallos, hojas, carpelos, cascarilla) representa un 20% del total del algodón en bruto (Villalba, 2010).

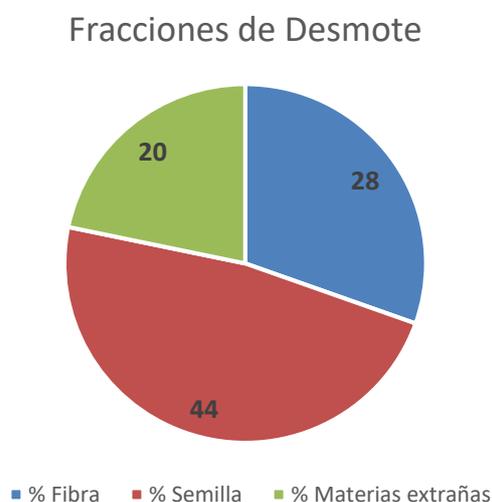


Figura 3.4: Fracciones de desmote de algodón stripper.

Fuente: Laboratorio de Fibra y Semilla, INTA – EEA Sáenz Peña

Según información brindada por el ingeniero Diego Bela, investigador perteneciente al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) en la Estación Experimental Agropecuaria Sáenz Peña (Chaco), es complejo conocer realmente que hacen las desmotadoras con el residuo generado; éstos representan un serio problema para las instalaciones por lo que cada desmotadora adopta medidas diversas de forma no regulada. Las que más invierten en tecnologías y tienen mayor presupuesto, generalmente los reutilizan como combustible alternativo para generar calor, otras en cambio los enfardan y los venden como suplemento dietario para algunos establecimientos lecheros o como material combustible para las ladrilleras. Algunas empresas utilizan parte de estos residuos para rellenar partes bajas de terreno o como abono directo para el suelo. Aunque en la actualidad, las normas ambientales nacionales prohíben la incineración de residuos, en algunos lugares se siguen quemando los mismos a cielo abierto.

En el ámbito académico, en los últimos años se realizaron diferentes trabajos de investigación para comprobar la factibilidad de producir bloques y placas de algodón mediante la aglomeración de residuos de desmote con ligantes cálcicos para su aplicación en la construcción de viviendas, aunque estas técnicas no han sido aún implementadas a gran escala.

Como se muestra en la Tabla 3.2, según datos publicados por el Ministerio de Agricultura de la Nación, en la campaña 2017 – 2018, la producción de algodón en las provincias de Chaco y Santiago del Estero

superó las 650 000 toneladas.

Tabla 3.2: Producción de algodón en Chaco y Santiago del Estero campaña 2017-2018.

Fuente: <https://www.magyp.gob.ar>

PROVINCIA	SUP. SEMBRADA (ha)	SUP. COSECHADA (ha)	RINDE (kg/ha)	PRODUCCIÓN (t)
CHACO	123 513	122 063	2177	265 745
SANTIAGO DEL ESTERO	126 780	124 930	3094	386 554
TOTAL	250 293	246 993	-	652 299

Considerando la producción de la campaña 2017-2018, la cual fue de 652 299 toneladas de algodón en bruto, y teniendo en cuenta que el promedio de residuos del desmote es del 20% del total, se puede establecer que sólo en estas dos provincias se generó en dicha campaña un total de 130 460 toneladas de materia orgánica sin disposición final claramente definida.

### 3.2.3 Marco normativo para el manejo de RDD en Argentina

A continuación, se describe brevemente la normativa que regula y condiciona el manejo y disposición de los residuos generados durante el desmote en Argentina.

- **Ley 25.612 de Residuos industriales:**

Con el objetivo de garantizar la preservación ambiental, la protección de los recursos naturales, la calidad de vida de la población, la conservación de la biodiversidad, y el equilibrio de los ecosistemas, esta ley establece en su Artículo 11 que los generadores de residuos industriales deberán instrumentar las medidas necesarias para:

- Minimizar la generación de residuos que producen, pudiendo para ello, adoptar programas progresivos de adecuación tecnológica de los procesos industriales, que prioricen la disminución, el reúso, el reciclado o la valorización, conforme lo establezca la reglamentación.
- Separar en forma apropiada los residuos incompatibles entre sí, evitando el contacto de los mismos en todas las etapas de la gestión.
- Envasar los residuos industriales, cuando las medidas de higiene y seguridad ambientales lo exijan, identificar los recipientes y su contenido, fecharlos y no mezclarlos, conforme lo establezca la reglamentación.

- **Ley 26.562 de Protección Ambiental para Control de las Actividades de Quema:**

Establece la prohibición de realizar cualquier actividad de quema de pastizales como así también de residuos vegetales que no cuente con la debida autorización de la autoridad local competente.

En adición a las dos leyes antes mencionadas, en el marco de las actividades de la cadena de producción de algodón, además de la obligación de la destrucción de rastrojos, el Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria establece otras resoluciones que deben ser cumplidas a fin de evitar principalmente la plaga del picudo de algodnero. Entre ellas se incluyen:

- **Resolución del SENASA 22/2016:**

Establece la obligatoriedad en todo el territorio nacional del encarpado total de todo medio que transporte algodón en bruto, fibra, semilla, grano, cascarilla, fibrilla, linter de algodón y/o desechos de desmote de algodón, cualquiera fuera su calidad y modalidad.

- **Resolución del SENASA 905/2009:**

Establece que, cuando se declaran zonas en cuarentena fitosanitaria afectadas fuertemente por la plaga, se prohíbe el egreso hacia otras zonas de partidas de fibra, semillas, subproductos y residuos de algodón, maquinaria agrícola, así como también de las bolsas utilizadas para la cosecha.

### 3.3 Caracterización de los residuos generados en el proceso de desmote

Como se mencionó en el capítulo anterior, la naturaleza y las características de la materia prima son elementos claves en la producción de biochar ya que influyen directamente en las propiedades del material obtenido luego de la pirólisis y también condicionan los procesos de producción, por lo tanto, es importante conocer los valores característicos de este tipo de material como información previa al diseño del sistema termoquímico.

Se han tomado datos de diferentes fuentes bibliográficas para establecer las características del RDD, el cual ha sido ampliamente analizado para la producción de compost y como opción viable para la producción de biocombustibles. Cuando fue posible, se obtuvieron datos de residuos provenientes de cosecha argentina; lamentablemente, no se encontraron muchos resultados relacionados a cultivos de origen argentino por lo cual, en la mayoría de los casos se recurrió a estudios de otros países.

Los valores encontrados son similares en todos los estudios, sin embargo, cabe destacar que pueden surgir diferentes composiciones en función de distintas condiciones ambientales de crecimiento y las relacionadas con el momento de la cosecha. Incluso dentro del mismo material vegetal, puede haber heterogeneidad en su composición (Verheijen et al., 2010). En este sentido, es fundamental realizar la caracterización y análisis correspondientes del residuo de desmote que se va a utilizar para la producción.

A continuación, se presentan la composición y características de los residuos de desmote y se explica de qué manera pueden influir en la producción de biochar, así como en el proceso para su obtención.

#### 3.3.1 Lignina, celulosa y hemicelulosa

La cantidad relativa de celulosa, hemicelulosa y lignina y el control de su descomposición es uno de los factores determinantes para identificar la idoneidad de un tipo de biomasa para uso en tecnologías termoquímicas. Los materiales con un alto contenido de lignina tienen superficies rígidas y tiempos y temperatura de descomposición (280-500 °C) más elevados, mientras que los materiales con altos porcentajes hemicelulosa se degradan a menor temperatura (160 – 260 °C) y con mayor facilidad. La celulosa se degrada a temperaturas intermedias entre ambas (240 – 350°C) (Verheijen et al., 2010). Un mayor contenido de celulosa en la composición hace que el material presente una desvolatilización más acentuada y más rápida, produciendo menores cantidades de carbón.

Esto afecta el rendimiento y la estructura final del biochar ya que la proporción relativa de cada componente determinará la medida en que la estructura de la biomasa es retenida durante la pirólisis. Yang et al (2006) observaron que el bio-aceite principalmente deriva los componentes de celulosa que conforman la biomasa, mientras que el biochar proviene de la lignina (como se cita en Jahirul et al., 2012). En la Tabla 3.3 se muestran los porcentajes correspondientes a la composición de lignina, celulosa, hemicelulosa y cenizas de RDD.

Tabla 3.3: Componentes (% en peso base seca) en residuos de desmote.

Fuente: (Piccioni et al., 2012)

Lignina	Celulosa	Hemicelulosa	Cenizas	Extraíbles
17	35	26	10,2	8,8

En el RDD, posee un alto porcentaje de celulosa y hemicelulosa mientras que el porcentaje de lignina (17%) es inferior al porcentaje correspondiente a materiales leñosos (por ejemplo: 27 % en cáscara de cacahuete, 30% madera de pino); los cuales poseen los rendimientos en la producción de biochar más altos pudiendo alcanzar rendimientos superiores al 40% en las condiciones de pirólisis más favorables (Tag et al., 2016). Además, la lignina le confiere al RDD la estructura y rigidez de sus paredes celulares, el biochar producido imita la estructura celular de la materia prima conformando su estructura porosa en base a ella (Lehmann & Joseph, 2015).

Considerando estos factores, se podrían prever entonces menores rendimientos de producción de biochar a partir de residuos de desmote. En este sentido, será importante controlar las condiciones de proceso, principalmente la temperatura y la tasa de calentamiento para lograr conservar una estructura porosa y el mayor rendimiento posible.

### 3.3.2 Humedad, densidad, tamaño de partícula

Estas características son importantes a la hora de diseñar el sistema de conversión termoquímica ya que afectan el rendimiento del proceso, así como también un adecuado funcionamiento del mismo.

La humedad de la materia prima es uno de los parámetros que rige la selección del método de pretratamiento antes de ingresar al sistema de producción de pirólisis, ya que en el caso de materiales húmedos (humedad >30%) es necesario realizar un secado previo. En los RDD, debido a que durante el proceso de desmote se seca el material con una corriente de aire caliente para mejorar la separación de la fibra y semilla, el porcentaje de humedad es en todos los casos menor al 10% (Díaz et al., 2002; Skordilis, 1992; Wanjura et al., 2014; Zabaniotou et al., 2000), por lo cual no sería necesario incorporar otro proceso de secado previo.

Los desechos de la desmotadora de algodón son livianos en comparación con otros materiales de biomasa. Su densidad aparente es de unos 25 kg/m<sup>3</sup>. Esto podría influir en la estabilidad del reactor en la conversión termoquímica, pudiendo tener inconvenientes para alcanzar un funcionamiento continuo y sin problemas del reactor (Jeoh & Agblevor, 2001). Además, el tamaño y la forma de las partículas de los desechos de la desmotadora de algodón no son uniformes. Una medida a considerar para evitar estos problemas sería poder compactar el material a través de la formación de briquetas o pellets que permitan generar un material más denso, de tamaño uniforme, reduciendo también el espacio de almacenamiento.

### 3.3.3 Análisis inmediato

Durante los procesos de calentamiento, la biomasa, similar a otros combustibles sólidos, se convierte en diferentes fases. Los análisis inmediatos consisten en aislar las especies que componen el material, en cada una de estas fases, de esta manera se determina el contenido de humedad, cenizas, materias volátiles y carbono fijo que contiene el mismo. Las partículas sólidas tienen tres etapas de pérdida de masa durante el calentamiento y bajo diferentes condiciones: secado, volatilización (liberación de volátiles que se queman mezclados con gases) y combustión de los residuos carbonosos y la importancia relativa de cada etapa puede ser estimada mediante el análisis inmediato. Estas características son útiles también para poder estimar el rendimiento del biochar que se obtendrá. En la Tabla 3.4 se especifican los porcentajes de cada material para RDD obtenidos en diversos estudios.

El carbono fijo es la masa de materia orgánica restante que queda después de que se libera el material volátil y la humedad tras la combustión. Se le considera el componente de mayor importancia energética, que genera una estructura cristalina, en lo cual el enlace químico se rompe en átomos de carbono (Bustamante-García et al., 2015). Está formado por estructuras carbonosas que al finalizar el proceso forman la masa carbonosa sólida de la biomasa tratada hasta la combustión.

Las cenizas son el residuo sólido resultante al producir la combustión completa del material. Puede

usarse como indicador de la cantidad de sales minerales y compuestos inorgánicos (Primaz, 2018). Los procesos termoquímicos a alta temperatura que utilizan materiales con alto contenido en cenizas no suelen ser satisfactorios, dado que el alto porcentaje de cenizas provoca una grave incrustación de las mismas, una intensificación de la lentitud del proceso y la corrosión, que requieren un mantenimiento frecuente (Jeoh & Agblevor, 2001). En adición a ello, el contenido de cenizas es un factor importante a considerar ya que los minerales de la materia prima se concentran y quedan retenidos en gran medida en el biochar resultante. Esto puede generar obstrucción en los poros de biochar y a la reducción de la superficie total del biochar (Verheijen et al., 2010).

El contenido volátil se define como la porción expulsada como gas por el calentamiento del material. Un alto contenido volátil hace que el material se queme más fácilmente y se sugiere que cuanto mayor sea el contenido de materia volátil, menor es la eficiencia energética del material cuando el objetivo es utilizarlo para la obtención de combustibles sólidos (Primaz, 2018).

Tabla 3.4: Análisis inmediato de residuos de desmote (% peso)

Referencia	Carbono fijo	Materiales volátiles	Cenizas	Humedad
(Wanjura et al., 2014)	15,72	69,48	15,52	2,09
(White et al., 1996)	15,10	67,30	11,20	5,49
(Zabaniotou et al., 2000)	16,33	64,51	14,03	5,13
<b>VALOR MEDIO</b>	<b>15,71</b>	<b>67,09</b>	<b>13,58</b>	<b>4,24</b>

De acuerdo con Jahirul et al. (2012), materia volátil, carbono fijo, las cenizas y la humedad son indicadores del rendimiento de los productos de pirólisis. La biomasa con alta materia volátil tiene mayor conversión, en comparación con la biomasa con alto carbono fijo. Teóricamente, la biomasa con una mayor fracción volátil puede ser adecuada para la producción de bio-aceite y syngas, mientras que con una mayor fracción de carbono fijo puede ser más adecuado para la producción de biochar (Jahirul et al., 2012).

Como se puede deducir de la Tabla 3.4, el porcentaje de carbono fijo del RDD es bajo, por lo que se podría esperar un bajo rendimiento en la producción de biochar durante el proceso de producción y un mayor rendimiento de syngas y bio-aceite.

Los RDD poseen un alto contenido de cenizas, derivado principalmente de la suciedad incorporada al material durante la cosecha y el transporte a las instalaciones de desmotado (Jeoh & Agblevor, 2001). Agblevor y otros (2006) demostraron que el tiempo de almacenamiento de estos residuos durante meses tuvo una influencia considerable en el aumento del porcentaje de cenizas de la materia prima. Debido a ello, sería importante tomar ciertas precauciones como cubrir el material para que no siga incorporando suciedad durante el almacenamiento y tratar de reducir los tiempos de almacenamiento lo máximo posible antes de ser empleado en la producción de biochar.

Un pretratamiento que se suele utilizar para reducir la carga mineral y, de esta forma, el contenido de cenizas de la materia prima, es llevar a cabo la desmineralización de la misma. Esto se consigue realizando un lavado de la biomasa, para retirar la materia mineral, ya sea mediante tratamiento con agua caliente, o con tratamientos con una base o un ácido. De manera general, el lavado con agua caliente se utiliza para eliminar la suciedad y la materia mineral disponible en la superficie de las partículas de biomasa durante la recolección, transporte y almacenamiento de biomasa. Sin embargo, el lavado con agua no es efectivo para poder reducir la carga mineral que se encuentra encapsulada

dentro de la matriz lignocelulósica; para ello se emplea un tratamiento ácido o básico, con el que se llega a destruir la estructura lignocelulósica de la biomasa facilitando el proceso de lavado (Muñoz & Luis, 2019).

Se debe tener en cuenta que, al realizar la desmineralización a través del lavado de la biomasa, se debería introducir un pretratamiento de secado posterior para eliminar la humedad adquirida. Es por ello que es necesario hacer pruebas a escala laboratorio, determinar qué porcentaje de materia mineral puede ser eliminada y además analizar los costes de estos pretratamientos y determinar si son convenientes en el sistema global.

### 3.3.4 Poder calorífico

El análisis elemental proporciona la composición química del material en términos de sus elementos principales: carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre, mientras que el contenido de oxígeno se calcula por diferencia. Este método analítico se basa en la oxidación. La composición de la biomasa se puede expresar en términos de sus elementos básicos:  $C + H + O + N + S + \text{cenizas} = 100\%$ , donde C, H, O, N, S y las cenizas son los porcentajes en peso de cada elemento y contenidos en la muestra.

Los resultados de estos análisis también se pueden usar para determinar el poder calorífico (PCI) de una materia prima dada. El contenido calórico por unidad de masa es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa; es la energía que se libera en forma de calor cuando la biomasa se quema completamente.

Tabla 3.5: Análisis elemental de residuos de desmote (% peso) y poder calorífico inferior (kJ/kg)

Referencia	C	H	N	S	O	PCI
(Zabaniotou et al., 2000)	41,23	5,03	2,63	0	34,00	15 780
(Zabaniotou et al., 2000)	44,89	4,73	2,49	0,44	33,42	15 480
(Skordilis, 1992)	43,20	-	1,80	0	35,10	16 526
(Díaz et al., 2002)	39,59	5,26	2,09	0,30	36,80	15 360
(Wanjura et al., 2014)	40,41	5,05	1,91	0,32	36,62	16 136
<b>VALOR MEDIO</b>	<b>41,86</b>	<b>5,02</b>	<b>2,18</b>	<b>0,21</b>	<b>35,19</b>	<b>15 889</b>

Se puede deducir de la Tabla 3.5 que la materia orgánica total (C, H, O) de los residuos de la desmotadora de algodón es de alrededor del 80% en peso. Esta parte convertible se acerca bastante a los materiales de desecho orgánico, como la paja y la cáscara de arroz y son valores característicos para materiales de estructura lingocelulósica (Agblevor et al., 2003).

Durante el proceso de pirólisis, los grupos funcionales orgánicos de las muestras de biomasa se descomponen y recombinan para formar materia volátil y, en consecuencia, la composición elemental de biochars cambia. Según estudios realizados por Primaz (2018) para biochar producidos a partir de borra de café y de residuos de algodón (principalmente cáscaras de semillas), los niveles de carbono, aumentan significativamente en el producto sólido después de la pirólisis (para los granos de café residuales, el aumento fue aproximadamente 49% a 74%, para semillas de algodón, el porcentaje del carbono pasó de ~ 44% a 65%). Este factor es importante a la hora de considerar el biochar como enmienda orgánica y como sumidero de carbono. Por otro lado, el contenido de hidrógeno, oxígeno y nitrógeno disminuyó en los productos sólidos para ambas materias primas.

Las materias primas que tienen un alto contenido de azufre pueden tener efectos negativos durante el

proceso, ya que este elemento reduce la temperatura en el proceso, limita la expulsión de gases y al oxidarse se forma  $\text{SO}_3$  (Bustamante García et al., 2016). Dado que, como se puede observar en la Tabla 3.5, el contenido de azufre en el RDD es bajo, se puede estimar que no se presentarán estos inconvenientes.

El poder calorífico aumenta en el biochar producido respecto a los de la biomasa original debido posiblemente a la formación de carbón durante el proceso (Primaz, 2018). Este incremento es favorable y debe ser considerado si el biochar producido será utilizado para aplicaciones energéticas.

### 3.3.5 Nutrientes y minerales

La cantidad de nutrientes y minerales presentes en la materia prima es importante debido a que parte de ellos quedan retenidos en el biochar y pueden servir como nutrientes para las plantas una vez incorporados a los suelos. En la Tabla 3.6 se muestran valores característicos de P, K, Na, Ca, Mg y la relación C/N para RDD.

Tabla 3.6: Nutrientes y minerales (g/kg) y relación C/N presentes en los residuos de desmote.

Fuente: (Díaz et al., 2002).

$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{K}_2\text{O}$	C/N	Na	Ca	Mg
3,7	14,3	26	5,1	23,3	3,3

Durante la degradación térmica de la biomasa, el potasio y el nitrógeno se vaporizan a temperaturas relativamente bajas, mientras que el calcio, el magnesio, el fósforo y el azufre, debido a una mayor estabilidad, lo hacen a temperaturas considerablemente más altas (Lehmann & Joseph, 2015). En la revisión bibliográfica realizada por Verheijen et al., (2010) se establece que las bajas temperaturas de procesamiento (<500 °C) favorecen la acumulación relativa de una gran proporción de K, Ca, Mg, P y S disponibles, favoreciendo la retención de nutrientes en los biochars.

### 3.3.6 pH

Según las fuentes consultas, el pH del RDD ronda en torno a valores de 6 a 6,5 (Skordilis, 1992; Tejada & Gonzalez, 2003). Éste tiende a aumentar tras el proceso de pirólisis, obteniéndose biochars alcalinos, los cuales tienden a incrementar su capacidad de intercambio catiónico (Rebolledo et al., 2016). No se ha encontrado información disponible de valores de CIC para RDD.

## 3.4 Proceso de producción de biochar a partir de RDD

Como se describió en el capítulo anterior, existen diferentes procesos termoquímicos para la producción de biochar, entre los que se encuentran la gasificación, la torrefacción seca, la carbonización hidrotérmica y la pirólisis. Este último es el proceso más ampliamente estudiado y utilizado para la obtención de biochar como enmienda orgánica (Bolan et al., 2019). En lo que respecta al resto de los procesos, en el caso de la gasificación, su objetivo es, como su nombre lo indica, generar un producto gaseoso que pueda ser utilizado, por ejemplo con fines energéticos, en este sentido, la generación de biochar es muy pobre, con rendimientos máxicos menores al 10% (Qian et al., 2015).

Si bien la torrefacción y la carbonización hidrotérmica generan altos rendimientos máxicos en la producción de biochar dependiendo de la materia prima utilizada (en un rango de 60% a 80% y entre 45% a 70 % respectivamente), según la información recabada estos procesos no son empleados habitualmente para la producción de biochar para su uso como enmienda orgánica y en la actualidad no se dispone de suficiente información sobre éstos en cuanto a la variabilidad y calidad del biochar producido. Kambo & Dutta (2015) destacan en su estudio que el producto sólido obtenido a través de

la torrefacción y la carbonización hidrotermal no cumple con los requerimientos de porosidad y estabilidad necesarios para un buen uso del mismo como enmienda.

Por lo anteriormente expuesto se selecciona el proceso de pirólisis para la obtención de biochar a partir de RDD, dejando de lado el resto de los procesos alternativos. En la Figura 3.5 se muestran los distintos procesos, destacándose el seleccionado.

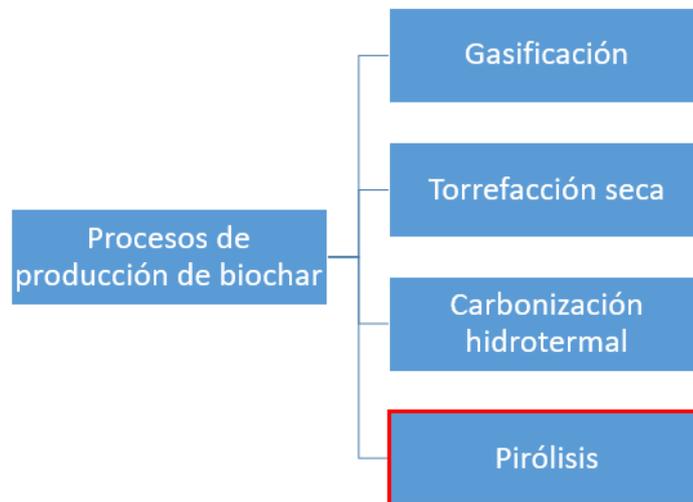


Figura 3.5: Procesos de producción de biochar.

### 3.4.1 Parámetros de proceso

Además de la materia prima seleccionada, la posibilidad de controlar la distribución de los productos obtenidos en el proceso de pirólisis mediante la elección de las condiciones de operación permite obtener altos rendimientos y buenas características en el producto final. Los parámetros más influyentes son:

- Velocidad de calentamiento
- Tiempo de residencia
- Temperatura

En el siguiente punto, se describe brevemente cómo influyen cada uno de estos parámetros en la producción de biochar para, de esta manera, seleccionar las condiciones de operación más favorables que permiten optimizar el proceso.

#### 3.4.1.1 Velocidad de calentamiento y tiempo de residencia

Estos dos factores están directamente relacionados y su principal impacto se refleja en la distribución de los productos de pirólisis. Altas velocidades y cortos tiempos de residencia favorecen la formación de bio-aceite, mientras que, en el sentido contrario, es decir a menores velocidades de calentamiento y tiempo de residencia mayores se obtienen mayores rendimientos para el producto sólido. Por este motivo es conveniente seleccionar un método de pirólisis lenta que permita aumentar el rendimiento en la obtención de biochar. En la Tabla 3.7 se especifican las características representativas de este método.

Tabla 3.7: características de la pirólisis lenta.

Fuente: (Adaptado de Lehmann &amp; Joseph, 2015 y Kambo &amp; Dutta, 2015)

MÉTODO	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO DE RESIDENCIA (min)	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO (°C/min)	RENDIMIENTO DE PRODUCTOS (%)		
				Bio-aceite	Biochar	Syngas
<b>PIRÓLISIS LENTA</b>	Rango amplio de temperatura (300 – 700)	30 – 180	5 – 30	0 - 15	<b>35 - 50</b>	40 - 75

Si bien los distintos autores coinciden en que los tiempos de residencia más altos y las menores velocidades de calentamiento favorecen la formación de producto sólido, es necesario llevar a cabo pruebas experimentales para establecer los tiempos de residencia y velocidad de calentamiento más adecuada para la pirólisis de RDD. Como referencia, en la revisión realizada por Kambo & Dutta (2015), en donde se exponen los resultados de la pirólisis lenta de diferentes materias primas (pino blanco, esquejes de frutas, hierba, paja de cebada, semillas de cártamo), los rendimientos más altos a distintas temperaturas (>30%) se obtuvieron empleando velocidades de calentamiento en un rango de 5 a 10 °C/min y tiempos de residencia entre 30 a 180 minutos.

#### 3.4.1.2 Temperatura

La temperatura es posiblemente el factor de pirólisis más crítico que afecta al rendimiento y a la distribución de los productos finales (Bolan et al., 2019) el proceso en función de la temperatura se encuentra dividido en cinco etapas las cuales se resumen en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8: Franjas de temperatura características de la descomposición de materiales lignocelulósicos.

Fuente: Adaptado de (Muñoz &amp; Luis, 2019)

ETAPA	FRANJAS DE TEMPERATURA (°C)	CARACTERÍSTICAS
1	< 120	Deshidratación de la biomasa
2	120 a 300	Liberación de pequeñas cantidades de gases ligeros (como CO, CO <sub>2</sub> o vapor de agua) procedentes de los grupos alcoholes pertenecientes a la hemicelulosa y la lignina
3	300 a 400	Mayor pérdida de peso durante el proceso debido a la liberación de compuestos volátiles. Fragmentación aleatoria de la celulosa y hemicelulosa. Generación de residuo carbonoso
5	>400	Liberación de CO y CO <sub>2</sub> mediante reacciones de despolimerización de la matriz carbonosa aromática rica en lignina

Como se expresa en la Tabla 3.8, la degradación térmica de la celulosa principalmente en el intervalo entre 300°C y 400°C, da como resultado una pérdida de masa considerable en forma de volátiles, dejando una matriz de carbono amorfa rígida. A medida que aumenta la temperatura de pirólisis, también lo hace la proporción de carbono aromático en el biochar, debido al aumento relativo en la pérdida de materia volátil (inicialmente agua, seguido de hidrocarburos, vapores alquitranados, H<sub>2</sub>, CO y CO<sub>2</sub>). Alrededor de 330°C, las láminas de grafeno poliaromático comienzan a crecer lateralmente, a expensas de la fase C amorfa, y finalmente se unen. Cuando se aumenta la temperatura de pirólisis se disminuye la funcionalidad superficial del carbón obtenido, disminuyendo de forma drástica la relación H/C, lo que indica una mayor aromaticidad de los materiales.

En adición a lo expuesto anteriormente, al aumentar la temperatura de pirólisis (> 500 °C) se favorece

la rápida volatilización de los componentes de la biomasa, produciéndose un incremento en la generación de gases y, en consecuencia, una disminución en el rendimiento del biochar y bio-aceite. Esto se debe a que, por un lado, se produce el craqueo de las moléculas orgánicas existentes en el gas de pirólisis, favoreciendo la formación de compuestos de menor peso molecular que constituyen los gases no condensables. Por otro lado, un incremento de la temperatura favorece la descomposición térmica del biochar.

Por encima de 600°C, la carbonización se convierte en el proceso dominante, la cual está marcada por la eliminación de la mayoría de los átomos distintos al C restantes y el consiguiente aumento relativo del contenido de C, que puede ser de hasta 90% (en peso) en biochars de materias primas leñosas (Verheijen et al., 2010).

A pesar de la ventaja que implica un aumento en el contenido de carbono en el biochar a altas temperaturas, en los estudios recabados por Verheijen et al. (2010) se ha observado que con el aumento de la temperatura los grupos hidroxilo tienden a desaparecer como resultado de la deshidratación, al igual que los carboxilos y fenólicos. La reducción de estos grupos en la superficie de los biochar les confiere un carácter hidrofóbico, siendo esta característica desfavorable para la capacidad de retención de agua del producto obtenido. Por otro lado, estudios realizados por Bolan y otros (2019) demostraron que la propiedad hidrofílica en los biochars producidos con diferentes materias primas aumentaron cuando la temperatura era superior a 400°C (sin superar los 500 °C) independientemente del tipo de materia prima.

En la Figura 3.6, se puede ver la proporción relativa de los productos de pirólisis obtenidos a diferentes temperaturas. Se observa una disminución prácticamente lineal del porcentaje de biochar obtenido a medida que la temperatura de pirólisis aumenta.

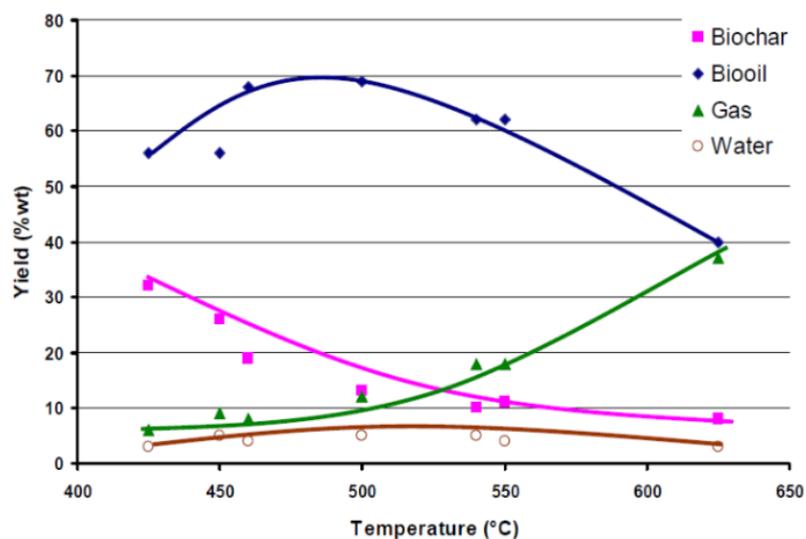


Figura 3.6: Proporción relativa de productos de pirólisis de biomasa.

Fuente: (Jahirul et al., 2012)

La temperatura de producción también influye en propiedades fisicoquímicas del biochar como el pH, el cual tiende a aumentar con el incremento de la temperatura (> 350 °C) debido a la pérdida de grupos ácidos (fenólicos y carboxílicos fundamentalmente). El aumento del pH con la temperatura también se debe a la separación de minerales y sales alcalinas de la fracción orgánica de la biomasa y el consecuente aumento del contenido de cenizas durante la pirólisis. El volumen de poros y la superficie BET también aumenta cuando aumenta la temperatura (Verheijen et al., 2010).

La temperatura de producción del biochar es un factor crítico para determinar su contenido de nutrientes, ya que una cierta fracción de los elementos de la materia prima puede perderse

excesivamente por volatilización. Las temperaturas de volatilización (TVs) más bajas se registran en N (TVs  $\sim 200^{\circ}\text{C}$ ) y S (TVs  $\sim 375^{\circ}\text{C}$ ) mientras que P y K tienen temperaturas de volatilización moderadas (TVs  $\sim 700\text{-}800^{\circ}\text{C}$ ). Se dice que nutrientes como el Ca, el Mg y el Mn son térmicamente estables a las temperaturas típicas de producción de biocarbón (TVs  $>1000^{\circ}\text{C}$ ) (Bolan et al., 2019). En este sentido, la pirólisis lenta a temperaturas inferiores a  $500^{\circ}\text{C}$  favorece la acumulación de micronutrientes fácilmente disponibles en el biochar (Verheijen et al., 2010).

En cuanto a los metales pesados, los PHAs y otras especies con propiedades fertilizantes, desinfectantes y antibióticas (por ejemplo, formaldehídos, creosoles, xilenoles, acroleína) también pueden acumularse en esas condiciones de operación (Verheijen et al., 2010). Sin embargo, la información recopilada por Verheijen y otros (2010), parecen sugerir que, es probable que la presencia de metales y otros compuestos contaminantes en el biochar obtenido tras la pirólisis sólo puedan producir un riesgo ambiental significativo tras la aplicación de biochar en grandes cantidades ( $>250$  t/ha). A pesar de ello, no se ha encontrado suficiente información sobre la lixiviabilidad de estos compuestos, lo que requeriría una evaluación completa y cuidadosa del riesgo de los contaminantes que pueden estar presentes en la materia prima, a fin de relacionar la toxicidad del contaminante con las condiciones de funcionamiento de la pirólisis y con las tasas de aplicación segura.

Estudios realizados por Zheng y otros (2013) y Ding y otros (2016), comprobaron que la temperatura de pirólisis también puede afectar a las fracciones lábiles y recalcitrantes de los nutrientes de un biochar. Por ejemplo, el biochar producido a alta temperatura ( $> 600^{\circ}\text{C}$ ) contiene un alto contenido de cenizas cuando los nutrientes existen principalmente como sales solubles que pueden liberarse fácilmente en el suelo (como se cita en Bolan et al. 2019). Un estudio de Zheng y otros (2013) informaron de un aumento significativo del contenido de P cuando la temperatura de la pirólisis se incrementó de  $300$  a  $600^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, el biocarbón producido a  $300^{\circ}\text{C}$  contenía una fracción baja de minerales cristalizados asociados al P con mayor biodisponibilidad que el P altamente cristalizado que se encuentra en el biocarbón de alta temperatura (Zheng et al., 2013).

Como se mencionó en el punto 1.1.1.3, un contribuyente clave de la calidad del suelo es su CIC, que es una medida del total de cationes que pueden ser retenidos por los sitios intercambiables del suelo. Este parámetro se rige principalmente por el contenido mineral y el carbono orgánico del suelo. En los suelos en que los factores mencionados son bajos, se exhibe una CIC reducida, lo que conduce a la consecuencia perjudicial de la lixiviación de nutrientes. Hay varios informes de un aumento notable en la CIC de los suelos sometidos a la enmienda de biocarbón. La CIC se debe principalmente a la carga superficial negativa en el biocarbón que surge tanto de la materia orgánica como de los grupos funcionales superficiales oxigenados. Las sustancias fúlvicas y húmicas presentes en el biocarbón actúan como sitios intercambiables para los cationes). Los grupos funcionales presentes en la superficie del biocarbón varían según las condiciones de pirólisis incorporadas. El biocarbón producido a baja temperatura ( $< 500^{\circ}\text{C}$ ) consiste en numerosos grupos lactónicos y carboxílicos en su superficie que se deprotonan en el suelo para producir aniones cargados negativamente capaces de unirse a los cationes mediante atracciones electrostáticas. En comparación, el biocarbón producido a mayores temperaturas es bajo en tales grupos funcionales, produciendo bajas CIC (Lehmann & Joseph, 2015).

Por todo lo expuesto anteriormente se reconoce la necesidad de encontrar una temperatura que permita optimizar el rendimiento del biochar y al mismo tiempo conseguir buenas propiedades para su posterior utilización, según la bibliografía consultada, se recomiendan para cumplir con estos objetivos temperaturas entre los  $400^{\circ}\text{C}$  y  $500^{\circ}\text{C}$ .

### 3.4.2 Balance de materia y energía

Los balances de materia y energía son una herramienta de la ingeniería de procesos que permite contabilizar flujos de materia y energía entre un proceso y su entorno. Como resultado de estos (calculados para un kilogramo de RDD tratado en base seca), y en base a la descripción de los parámetros de proceso expuestos en el apartado 3.4.1, se obtienen las cantidades de productos de

pirólisis, así como los requerimientos energéticos del proceso.

Lo que se busca mediante el balance de energía es determinar si el pirolizador puede ser térmicamente autosostenible. Es decir, poder aprovechar la energía contenida en el gas generado tras el proceso de pirólisis para alimentar energéticamente al reactor.

### 3.4.2.1 Balance de materia

Para el balance de materia se debe considerar que el producto inicial de la pirólisis lenta, resultado de la descomposición de la biomasa en el reactor de pirólisis, está compuesto de gases condensables (moléculas más pesadas) que al condensar se transforman en bio-aceite, gases no condensables (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>) y biochar.



Además del reactor, en el proceso de pirólisis también se encuentra un sistema de limpieza de los gases. Éste consiste en un ciclón que permite la separación de las partículas que hayan sido arrastradas por el gas, las cuales salen por la parte inferior. El gas no condensable se dirige al combustor mientras que los gases condensables al enfriarse se convierten en bio-aceite. Posteriormente éste puede ser almacenado para futuros usos como biocombustible o también puede analizarse su utilización para obtener, junto con el syngas, la energía que se necesita en el reactor. En la Figura 3.7 se esquematiza el proceso completo.

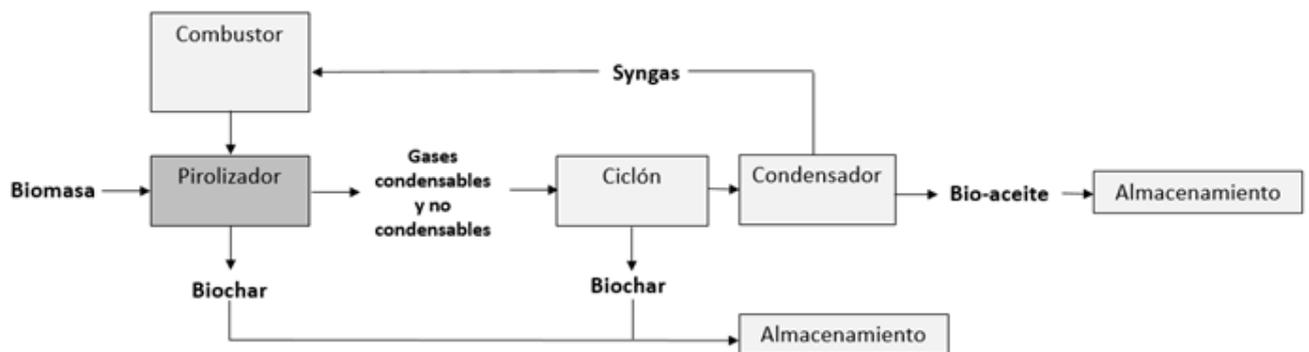


Figura 3.7: Proceso de pirólisis

Como se describió en el apartado 3.4.1.1, los rendimientos de los productos finales de la pirólisis lenta (% peso) son de 0 a 15% líquido (bio-aceite), 35 a 50% biochar y de 50 a 70% gas (syngas). Sabiendo que la obtención de biochar depende en gran medida de la cantidad de lignina de la materia prima, y conociendo que el porcentaje de lignina en los RDD es baja (17%) en comparación con otros materiales leñosos (de 25% a 35% de lignina) que producen los rendimientos de biochar más altos (hasta 50%), se espera entonces un menor rendimiento y es por esto que se establece el porcentaje de obtención más bajo del rango que se encuentra en bibliografía, es decir, se supone para los cálculos que se podrá obtener un 35 % de biochar a partir de los RDD en las mejores condiciones de pirólisis.

Para el caso del bio-aceite y syngas se toman valores medios de los rangos antes mencionados. De esta manera se imponen las distribuciones másicas de los productos por masa de RDD introducida en el sistema de pirólisis, recogidos en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9: Distribución de productos (rendimiento másico) de pirólisis lenta de RDD

BIO-ACEITE	BIOCHAR	SYNGAS
7%	35%	58%

Con la distribución de productos establecida y, mediante las siguientes ecuaciones, se calculan los caudales de salida del sistema.

$$m_{BA} = m_{BM} \cdot \eta_1 \quad \text{Ecuación 3.1}$$

$$m_{BC} = m_{BM} \cdot \eta_2 \quad \text{Ecuación 3.2}$$

$$m_{SG} = m_{BM} \cdot \eta_3 \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Siendo:

$m_{BM}$  = kg de RDD (biomasa en base seca) ingresados al sistema

$m_{BA}$  = kg de bio-aceite a la salida del sistema

$m_{BC}$  = kg de biochar a la salida del sistema

$m_{SG}$  = kg de gases no condensables a la salida del sistema

$\eta_1$  = rendimiento másico bio-aceite

$\eta_2$  = rendimiento másico biochar

$\eta_3$  = rendimiento másico syngas

Considerando una conversión de la materia prima del 100% y tomando como base para el cálculo 1 kg de residuo de desmote se obtienen los siguientes resultados resumidos en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10: Resultados Balance de Materia

ENTRADA AL SISTEMA (kg)	
Residuos de desmote	1
PRODUCTOS (kg)	
Bio-aceite	0,07
Biochar	0,35
Syngas	0,58

Para conocer la cantidad de biochar que podría ser potencialmente producido a partir de los RDD en Argentina se consideró la campaña 2017-2018 en la cual, como se describió en el punto 3.2.2, sólo en las provincias de Chaco y Santiago del Estero se generaron un total de 130 460 toneladas de materia

orgánica tras el proceso de desmote sin disposición final claramente definida.

Si se considera que la totalidad de esta materia orgánica puede ser recuperada y empleada como materia prima para la producción de biochar, y a partir de los resultados obtenidos en el balance de materia, se puede estimar la cantidad de biochar que se podría obtener anualmente.

$$m_{BC\ anual} = m_{BM\ anual} \cdot \eta^2 \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Siendo:

$m_{BM\ anual}$  = toneladas de RDD generadas durante la campaña 2017-2018.

$m_{BC\ anual}$  = toneladas de biochar que se podría obtener anualmente.

$$m_{BC\ anual} = 45\ 661\ \text{toneladas/año}$$

Como se describió en el punto 3.4.3, para conocer la cantidad de biochar a aplicar en los suelos deben considerarse diferentes factores según las características del lugar y los objetivos de su aplicación. Estudios previos han establecido la aplicación de cantidades de biochar que se encuentran entre 10 t/ha y 50 t/ha (Fiallos Ortega et al., 2015; Lehmann & Joseph, 2015; Verheijen et al., 2010).

Basándose en dichos estudios y tomando un valor medio de aplicación de biochar de 30 t/ha, se puede estimar la extensión de terreno en la cual el biochar producido podría ser aplicado.

$$h_{BC} = \frac{m_{BC\ anual}}{a_{BC}} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Siendo:

$h_{BC}$  = hectáreas de terreno para aplicación de biochar anualmente

$a_{BC}$  = valor medio de aplicación de biochar (30 t/ha)

$$h_{BC} = 1\ 522\ \text{hectáreas/año}$$

Según el resultado arrojado, el biochar producido anualmente podría aplicarse a una extensión de 1522 hectáreas de terreno, en el cual se podrían ver mejoradas sus propiedades. Ésta podría incluir diferentes zonas de cultivos, huertas agroecológicas, restauración de bosques o pequeñas extensiones de terreno.

Si bien dicha extensión representa sólo el 0,6% de la superficie de algodón sembrada entre ambas provincias (ver Tabla 3.2), el biochar producido podría por ejemplo ayudar a la mejora de las propiedades de los terrenos de los productores minifundistas (ver punto 3.4.2.2) quienes no superan las 10 hectáreas de superficie agrícola, y representan el 82% de los productores a nivel nacional.

### 3.4.2.2 Balance de energía

Para conocer los requerimientos de energía en el proceso de pirólisis y determinar si los productos del proceso pueden suplir dicha necesidad energética se calcula a continuación el calor que es necesario aportar al sistema.

En base a la energía contenida en la fracción gaseosa no condensable se pretende determinar si ésta es suficiente para proporcionar energía a un sistema térmicamente autosostenible. El producto sólido (biochar) queda excluido de un uso energético ya que es el producto buscado y se aplicará al suelo como enmienda.

Para efectuar el balance de energía se establecen las siguientes consideraciones:

- Todo el biochar generado proviene del pirolizador, considerándose despreciable la cantidad que se obtiene del ciclón.
- La biomasa que ingresa a la unidad de pirólisis tiene una conversión total (100%) a productos (mezcla de gases condensables y no condensables y biochar).
- No existen pérdidas en la unidad de pirólisis.
- La pirólisis se lleva a cabo en total ausencia de oxígeno.

A continuación, se especifican los parámetros de procesos y las características energéticas de los distintos compuestos.

#### 3.4.2.2.1 Temperatura de pirólisis

Según lo expuesto en el punto 3.4.1.2, en donde se analiza cómo influye la temperatura en el proceso de pirólisis, se recomiendan temperaturas entre 400 °C y 500 °C para maximizar la producción de biochar y optimizar sus propiedades. Para llevar a cabo el balance energético se realiza un análisis comparativo de tres temperaturas de pirólisis diferentes (400 °C, 450 °C y 500 °C), para determinar y recomendar posteriormente la temperatura óptima de pirólisis, que permita obtener un producto de buena calidad para enmienda y que sea energéticamente sostenible.

#### 3.4.2.2.2 Temperatura de entrada de biomasa al proceso de pirólisis

En el balance energético se analizan dos alternativas de temperatura de entrada de la biomasa al proceso de pirólisis, la primer opción corresponde a la entrada sin tratamiento (25 °C), mientras que, como segunda opción, se estudia la posibilidad de la introducción de la biomasa a una temperatura de 110 °C, la cual puede ser alcanzada tras un pretratamiento de secado, el cual no sólo permitirá reducir la demanda energética del proceso de pirólisis sino que además permitirá reducir el contenido de humedad que podría estar presente en los RRD.

#### 3.4.2.2.3 Entalpía de reacción

La entalpía de reacción del proceso de pirólisis de biomasa se obtuvo de bibliografía estableciéndose para ella un valor de 255 kJ/kg (Basu, 2013).

#### 3.4.2.2.4 Calor específico

Se tomaron valores medios obtenidos de diferentes fuentes bibliográficas para cada uno de los productos del proceso de pirólisis, así como también para la biomasa utilizada como materia prima (Alper et al., 2017; Basu, 2013; Belmonte, 2017). Los mismos se resumen en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11: Calor específico de los compuestos del proceso de pirólisis.

	BIOCHAR	BIO-ACEITE	SYNGAS	RDD
CP (KJ/KG.K)	1,1	2,2	1,05	1,5

### 3.4.2.2.5 Cálculo del calor requerido en el sistema

Una vez determinada la distribución de fracciones de productos, sus respectivos calores específicos y la temperatura del proceso, se pueden realizar los cálculos correspondientes al balance de energía. Para éste se emplea la siguiente ecuación:

$$Q = m_{BM} \cdot H \cdot X + m_{BC} \cdot C_{pBC} \cdot \Delta T1 + m_{BA} \cdot C_{pBA} \cdot \Delta T1 + m_{SG} \cdot C_{pSG} \cdot \Delta T1 - m_{BM} \cdot C_{pBM} \cdot \Delta T2$$

*Ecuación 3.6*

Siendo:

$Q$ = calor requerido para el proceso de pirólisis (kJ/kg)

$H$ = entalpía de reacción del proceso de pirólisis (kJ/kg)

$X$ =conversión de la biomasa (100%)

$T_p$ = Temperatura de pirólisis

$T_{ref}$ = Temperatura de referencia (25°C)

$T_e$ = temperatura de entrada de la biomasa al proceso de pirólisis

$\Delta T1 = T_p - T_{ref}$

$\Delta T2 = T_e - T_{ref}$

$C_{pBC}$  = calor específico del biochar (kJ/kg.K)

$C_{pBA}$  = calor específico del bio-aceite (kJ/kg.K)

$C_{pSG}$ = calor específico del syngas (kJ/kg.K)

$C_{pBM}$  = calor específico de los RRD (kJ/kg.K)

En la Tabla 3.12 se presentan los resultados del balance energético para cada una de las temperaturas de pirólisis seleccionadas. Para cada una de dichas temperaturas se han analizado las dos propuestas de temperatura de entrada de la biomasa (sin pretratamiento y con pretratamiento de secado).

Tabla 3.12: Requerimiento energético del proceso de pirólisis para diferentes temperaturas.

Requerimiento energético del proceso de pirólisis (kJ/kg)			
T° de proceso \ T° de entrada biomasa	400 °C	450 °C	500 °C
25 °C	685,5	742,9	800,3
110 °C	558	615,4	672,8

### 3.4.2.2.6 Cálculo de la energía disponible en el gas no condensable

El poder calorífico inferior del syngas ( $PCI_{syngas}$ ) fue calculado multiplicando los porcentajes máxicos de los componentes principales del gas de pirólisis de residuos de algodón a diferentes temperaturas por sus respectivos poderes caloríficos. Dichos valores se muestran en la Tabla 3.13, éstos fueron

obtenidos de estudios previos realizados por otros grupos de investigación (Jahirul et al., 2012).

Tabla 3.13: Composición del gas de pirólisis de residuos de algodón a diferentes temperaturas con sus respectivos poderes caloríficos y PCI del syngas.

Fuente: (Jahirul et al., 2012)

T° de pirólisis / Componentes (%p.p)	400 °C	450 °C	500 °C	Poder calorífico inferior (kJ/kg)
H	1,39	1,63	2,08	120,00
CO	43,97	49,98	56,49	10,01
CH <sub>4</sub>	7,43	10,01	9,19	50,05
CO <sub>2</sub>	47,20	38,37	32,22	
<b>PCI<sub>syngas</sub> (kJ/kg)</b>	<b>982,93</b>	<b>1201,87</b>	<b>1280,84</b>	

Como se observa en la Tabla 3.13, el syngas se compone principalmente de hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y metano. Estos componentes se obtienen durante varias reacciones endotérmicas a altas temperaturas de pirólisis. Dichas temperaturas afectan de forma significativa a la composición del gas (Jahirul et al., 2012).

El H<sub>2</sub> y los hidrocarburos ligeros como el CH<sub>4</sub> se producen a partir del craqueo de hidrocarburos más pesados a temperaturas más altas, por este motivo el porcentaje de éstos aumenta con el aumento de la temperatura de pirólisis (Jahirul et al., 2012).

El CO y el CO<sub>2</sub> son los indicadores de la presencia de oxígeno en la biomasa. Estos componentes se originan principalmente a partir del craqueo de compuestos orgánicos parcialmente oxigenados. Por lo tanto, como polímero altamente oxigenado, la cantidad de celulosa presente en la biomasa (35% en los RDD) es un factor importante que determina la cantidad de óxidos de carbono producidos (Xinyan et al., 2018).

Debido a que la composición del syngas varía con la temperatura de proceso, también lo hace la energía que éste contiene. Ésta puede ser utilizada como combustible para el pirolizador.

Para estimar la energía disponible que puede emplearse como combustible para el proceso de pirólisis a diferentes temperaturas se utilizó la siguiente ecuación, en donde se considera una eficiencia del 90%:

$$E_{\text{syngas}} = 0,9 \cdot \text{PCI}_{\text{syngas}} \cdot \eta_3$$

*Ecuación 3.7*

$$E_{\text{syngas}} (400 \text{ °C}) = 513,09 \text{ kJ/kg}$$

$$E_{\text{syngas}} (450 \text{ °C}) = 627,38 \text{ kJ/kg}$$

$$E_{\text{syngas}} (500 \text{ °C}) = 668,60 \text{ kJ/kg}$$

#### 3.4.2.2.7 Energía externa requerida

Analizando los resultados anteriores, se puede observar que como primera opción, sin un pretratamiento de secado, el requerimiento energético para el sistema de pirólisis es superior a la energía contenida en la fracción másica de syngas para las tres temperaturas analizadas.

En esta primera opción, será necesario la incorporación de una fuente externa de energía que permita suministrar el resto del calor requerido (172,4 kJ/kg para una temperatura de pirólisis de 400 °C; 115,5 kJ/kg para 450 °C; 131,7 kJ/kg para una temperatura de pirólisis de 500°C). En este sentido, aunque el rendimiento másico de bio-aceite estimada es baja, se puede considerar como otra opción el análisis de su poder calorífico y su empleo como combustible para contribuir a suplir dicha necesidad energética.

Debido a la carencia de datos bibliográficos y a que es necesario llevar a cabo pruebas experimentales para conocer y comprender la viabilidad de la aplicación y factibilidad de la utilización del bio-aceite como biocombustible, el análisis de su empleo como combustible para el pirolizador queda excluido del presente estudio, dejándose para futuros trabajos experimentales en los cuales se puedan llevar a cabo las pruebas necesarias.

Como segunda opción, la introducción de un pretratamiento de secado previo de la materia prima, permite reducir el requerimiento energético del proceso de pirólisis. Dicho requerimiento puede ser cubierto sólo con la energía contenida en la fracción másica del syngas si se selecciona la temperatura de pirólisis de 450 °C. En este caso, el calor residual del proceso de pirólisis podría ser empleado para el secado de los RDD y debería analizarse si éste es suficiente para alcanzar la temperatura de alimentación propuesta (110 °C).

#### 3.4.3 Características esperadas para el producto obtenido

Para conocer exactamente las características del biochar obtenido, es necesario llevar a cabo pruebas experimentales y su posterior análisis. Debido a que en el alcance del presente estudio queda excluida la experimentación, no es posible hacer esta caracterización. Por este motivo se decidió tomar como base las correlaciones ofrecidas por *The European Biochar Certificate (EBC)* para establecer las características que se esperan obtener a partir de la pirólisis de los RDD, con el objetivo de que el mismo pueda ser utilizado como enmienda orgánica y además poder limitar los riesgos de la utilización del biochar y ayudar a los usuarios y productores a prevenir o al menos reducir cualquier peligro para la salud y el medio ambiente durante la producción y utilización del biochar.

*EBC* fija los valores de los diferentes parámetros que debe cumplir el biochar para que el mismo pueda ser utilizado como enmienda orgánica. Si bien esta certificación voluntaria se encuentra vigente actualmente en Europa, en Latinoamérica no existe al día de hoy una entidad que nucleee y fomente la producción de biochar, es por ello que se toman los criterios previstos por *EBC* para el presente estudio. A continuación, se exponen los principales parámetros a considerar y los valores esperados:

- *Contenido de carbono orgánico*

El contenido de carbono orgánico del biochar varía entre el 35 % y el 95 % de la materia seca, dependiendo de la materia prima de la biomasa y la temperatura de la pirólisis. En particular, el carbono presente en el biochar de residuos de cultivos como la paja y la cáscara de los granos es inferior al 50% (Schmidt et al., 2012).

Los valores de carbono fijo obtenidos en diversos estudios a partir del análisis inmediato de RDD (ver punto 3.3.3), arrojaron porcentajes menores al 20 %. Es de esperar entonces que el porcentaje de carbono orgánico presente en el producto de pirólisis sea también reducido.

- *Estabilidad del carbono*

Cuando se pretende utilizar el biochar como sumidero de carbono, la determinación de la proporción de carbono estable presente es de especial importancia. En el biochar pueden existir diversas estructuras de carbono, algunas más recalcitrantes que otras. La estructura en la que se encuentra ordenado el carbono tiene influencia sobre la estabilidad. Una aproximación a la determinación de la estabilidad del carbono se puede estimar utilizando las relaciones molares O/C y H/C del biochar, las cuales se consideran parámetros que suministran información acerca del grado de transformación de la biomasa al ser pirolizada.

Inicialmente la determinación de las relaciones molares H/C y O/C se podían calcular utilizando el carbono total para la certificación del EBC. Sin embargo, a partir de enero del 2013, el EBC ha decidido utilizar el carbono orgánico para la determinación de las relaciones molares. La justificación se debe a que el biochar puede contener carbono inorgánico en forma de carbonatos que no forman parte de las estructuras recalcitrantes, por lo que las relaciones molares pueden ser incorrectas.

- *Relación molar H/C<sub>orgánico</sub>* : La relación molar H/C<sub>orgánico</sub> es un indicador del grado de carbonización y por lo tanto de la estabilidad del biochar. Los valores fluctúan dependiendo de la biomasa y el proceso utilizado. Aquellos biochars con una relación molar H/C<sub>orgánico</sub> de 0,3 contienen mayoritariamente estructuras de anillos aromáticos o condensadas, y para valores superiores a 0,7 existe una importante presencia de estructuras no condensadas, como la lignina, que han resistido al proceso de pirólisis (Schmidt et al., 2012). De acuerdo a las condiciones de proceso seleccionadas se esperan valores inferiores a 0,7.
- *Relación molar O/C<sub>orgánico</sub>* : Además de la relación H/C<sub>orgánico</sub>, la relación O/C<sub>orgánico</sub> también es relevante para caracterizar el biochar y diferenciarlo de otros productos de carbonización. EBC establece que se debe obtener una relación O/C<sub>orgánico</sub> menor a 0,4.

- *Contenido de nutrientes*

El contenido de nutrientes del biochar debe ser declarado al menos en lo que respecta al nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio y calcio. El contenido de nutrientes de los diferentes biochars fluctúa ampliamente y puede representar hasta un tercio del peso total. La disponibilidad de fósforo encontrada en diferentes biochars oscila en porcentajes alrededor del 15%, la del nitrógeno un mero 1%, mientras que la disponibilidad de potasio puede llegar al 50% (Schmidt et al., 2012).

Cabe señalar que estos nutrientes pueden estar disponibles sólo en parte para las plantas, en este sentido su disponibilidad es importante para el empleo del biochar como enmienda orgánica.

- *pH*

Diferentes estudios de caracterización de biochar han arrojado valores en donde el pH varía de levemente ácido a alcalino, con una media de pH de 8,1 y un intervalo entre 6,2 y 13 (Qian et al., 2015). Como se mencionó en el punto 3.3.6, el pH del RDD ronda en torno a valores de 6 a 6,5 (Skordilis, 1992; Tejada & Gonzalez, 2003). Éste tiende a aumentar tras el proceso de pirólisis, por lo cual se espera la obtención de biochars alcalinos (pH > 7). Este valor es favorable para la aplicación como enmienda orgánica ya que, como se describió en el punto 1.1.1.3, la capacidad de intercambio catiónico del biochar se incrementa a pH alcalinos (Rebolledo et al., 2016).

- *Área superficial y estructura*

Las propiedades de superficie y la estructura son características importantes, ya que influyen en las funciones esenciales para la capacidad de retención de agua, nutrientes y actividad microbiana.

Según diferentes estudios realizados en distintos tipos de biochars, el área superficial y la capacidad hidrofílica parece estar influenciada por la HTT, observándose que dicha capacidad aumenta en los biochars pirolizados con temperaturas superiores a 400 °C. Un área superficial específica más alta y más microporos resultantes de temperaturas de pirolización más altas podrían ser el factor crítico para retener agua (Bolan et al., 2019). EBC sugiere el empleo de biochars con un área superficial mayor a

150 m<sup>2</sup>/g.

- *Metales pesados*

Con la excepción de algunos metales pesados que son volátiles o semivolátiles a la temperatura de pirólisis (por ejemplo, el mercurio), la cantidad de metales pesados originalmente contenida en la biomasa es retenida en el biochar. En este sentido, la pirólisis lenta de la biomasa permite que los metales queden fijados en la matriz, lo que hace que tengan menor lixiviabilidad. Debido a que durante la pirólisis el peso de la biomasa original se reduce, el contenido en el biochar es mayor que en la biomasa original. Por este motivo se debe considerar y hacer un análisis previo para conocer el contenido de metales pesados de la materia prima original, la cual no debería crecer en suelos contaminados o no debería haber sufrido un aumento considerable de la concentración de metales pesados durante su crecimiento (debido por ejemplo a la pulverización con ciertos agroquímicos) o debido a la contaminación con desechos.

EBC establece valores máximos para el contenido de metales pesados, basándose en la Ordenanza Federal Alemana de Protección de Suelos, los cuales se exponen en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14: Valores máximos (mg/kg) establecidos para contenido de metales pesados en biochar.

Fuente: (Schmidt et al., 2012)

Pb	Cd	Cu	Ni	Hg	Zn	Cr
< 150	< 1,5	< 100	< 50	< 1	< 400	< 90

- *Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs)*

La pirólisis de materiales orgánicos provoca la liberación de HAPs. Su cantidad depende principalmente de las condiciones de procesamiento, un contenido elevado de HAPs en el biochar sería el reflejo de condiciones de pirólisis no satisfactorias para la producción de biochar. De acuerdo a los límites de concentración de HAPs en biochar recogidos en el EBC, un biochar “clase premium” no deberá exceder un total de HAPs de 4 mg/kg, mientras que el límite para la “clase básica” se encuentra en 12 mg/kg.

### 3.4.4 Factores a tomar en consideración para la implementación de la producción

A través del análisis realizado y después de comprender el sistema de producción de algodón en Argentina, surgen aspectos a remarcar los cuales deberían ser considerados y estudiados en cada caso a la hora de implementar sistemas de producción de biochar a partir de los residuos de desmote.

#### 3.4.4.1 Análisis de los RDD

Como ya se ha descrito en los puntos anteriores, la materia prima influye directamente en la calidad del producto final; es por ello que, previo a la producción de biochar es necesario llevar a cabo un análisis de los RDD. Las desmotadoras reciben en cada campaña algodón proveniente de diferentes campos, los cuales pueden crecer en distintas condiciones y pueden verse afectados por productos no deseados (agroquímicos, tóxicos, otros contaminantes), por ello se detecta la necesidad de un análisis previo del lote antes de efectuar el proceso de pirólisis.

#### 3.4.4.2 Almacenamiento de los RDD

Como se describió en el punto 3.2, tras el desmotado, en las plantas desmotadoras los residuos generados son almacenados en un área apartada de la planta. Sería importante poder llevar a cabo el

proceso de pirólisis posterior al proceso de desmontado (no almacenar el residuo por un tiempo prolongado) para, de esta manera, aprovechar la extracción de humedad que se ha realizado previamente durante las diferentes etapas del desmote y evitar así un pretratamiento de secado previo a la pirólisis.

En el caso de que la producción de biochar se lleve a cabo en un lugar diferente a la desmotadora, los RDD deberán ser mantenidos en condiciones bajas de humedad, en lugares cerrados para que no sean afectados por las inclemencias temporales.

#### **3.4.4.3 Almacenamiento del biochar**

Los biochars producidos a partir de residuos de cultivos ofrecen una estructura más fina y quebradiza (Verheijen et al., 2010), por lo que es recomendable su almacenamiento en bolsas cerradas que eviten la dispersión del mismo, lo cual facilitará además su posterior transporte. Además, estos empaques deben ser almacenados de tal manera que no se produzca ninguna contaminación. Se debe prestar especial atención a los contaminantes gaseosos (por ejemplo, gases de escape de vehículos) ya que éstos pueden ser absorbidos por el biochar (Schmidt et al., 2012).

#### **3.4.4.4 Alimentación energética del pirolizador**

Según los cálculos efectuados en el balance de materia y energía, si se opta por la introducción de la materia prima a temperatura ambiente, para el funcionamiento del pirolizador será necesario un aporte extra de energía además del provisto por el syngas. En este sentido, y con el objetivo de poder desarrollar un proceso de producción sostenible, se debería evitar el empleo de combustibles fósiles. Una alternativa, además del estudio de la posibilidad de emplear el bio-aceite generado tras la condensación de los gases, podría ser el uso del calor residual de otros procesos, como el proveniente de las etapas de secado durante el desmote o el empleo de fuentes alternativas de energía como ser la energía solar.

El calor residual del proceso de pirólisis también puede ser empleado, por ejemplo, para el secado de los RDD (en el caso que sea decida efectuar este pretratamiento), para calefacción de distrito, o para fines sostenibles similares.

#### **3.4.4.5 Salud ocupacional y seguridad**

Las instalaciones de producción de biochar, así como las relacionadas con el transporte y el almacenamiento, pueden plantear un riesgo para la salud ocupacional de los trabajadores involucrados, en particular cuando se trata de la exposición al polvo de biochar. Las investigaciones realizadas sobre la exposición aguda y crónica al polvo de biochar, en particular a su fracción de tamaño nanométrico, siguen siendo escasas. El pequeño tamaño de la fracción de polvo del biochar le confiere la capacidad para entrar y transitar por el interior de los organismos vivos, lo cual podría causar problemas de salud a corto y mediano plazo (Verheijen et al., 2010).

En el contexto de la salud ocupacional, la reducción de la exposición al polvo de biochar requiere la aplicación de medidas estrictas de salud y seguridad. En el caso de los biochars que contienen una gran proporción de polvo, los riesgos para la salud relacionados con el transporte y el almacenamiento seguros, así como con la aplicación, pueden reducirse utilizando técnicas de control del polvo (Lehmann & Joseph, 2015). Por ejemplo, cubrir o envolver los montones de biochars o rociar la superficie con soluciones estabilizadoras puede reducir al mínimo el riesgo de exposición durante el transporte y el almacenamiento.

Por lo expuesto anteriormente, los trabajadores deberán estar equipados con ropa de protección adecuada y máscaras de respiración en caso de ser necesario.

### 3.4.5 Retos y oportunidades

En la actualidad, en Argentina no existe ninguna organización que se dedique a la producción de biochar. Incluso a día de hoy a nivel internacional no existe un modelo comercial establecido en el sentido de un conjunto de normas aceptadas por toda la industria para la producción, distribución y utilización del biochar. Lo que hay es una multitud de empresas de nueva creación y otras entidades que están experimentando con tecnologías de pirólisis que operan a varias escalas. Es por ello que surge un primer cuestionamiento respecto a dos posibilidades principales de llevar a cabo la producción de biochar en Argentina a partir de RDD: adoptar un enfoque local a pequeña escala en el que el biochar se produce en el lugar donde se encuentran los residuos que servirán como materia prima para su obtención o, como segunda alternativa, el biochar puede producirse de forma centralizada e industrial.

En el primer caso, las plantas desmotadoras se harían cargo de la producción de biochar para su posterior comercialización. Cada empresa tiene que utilizar equipo de pirolisis acorde a los volúmenes de producción que ellos mismos generen; equipos más pequeños permiten una mayor versatilidad y adaptación a los volúmenes de las diferentes campañas, así como a los espacios disponibles en las plantas desmotadoras. La posterior utilización del material producido podría ser comercializado e incluso ser utilizado por los propietarios de los campos que proveen el algodón a las desmotadoras. Tomando en consideración que las empresas desmotadoras deben hacerse cargo del residuo generado, este aporte económico, así como el obtenido de la venta del producto final contribuirían como ingresos a la hora de realizar un análisis de factibilidad financiera de este proyecto.

En el segundo escenario, la posibilidad de la creación y puesta en marcha de una planta de producción de biochar independiente de las desmotadoras debería ser analizada. Es de suma importancia el análisis de la zona geográfica para su emplazamiento ya que la misma podría recibir RDD de las distintas provincias principalmente de las que se analizaron en el presente estudio. En este caso, el manejo de mayores volúmenes de producción podría requerir la incorporación de mayor tecnología y por consiguiente mayor inversión.

Otro aspecto a considerar es el transporte de los RDD desde las plantas desmotadoras hacia la empresa productora de biochar, debido a principalmente los costes asociados, la contaminación que esto genera y, además la posibilidad de contribuir a una mayor proliferación de la plaga del picudo algodonoero si no se toman las medidas de prevención necesarias. Un factor clave es el establecer contacto con cada una de las empresas generadoras del residuo para obtener información concreta del volumen de generación y establecer las rutas de recogida con la finalidad de optimizar el sistema de transporte y disminuir las cargas ambientales asociadas al mismo.

En el caso de que se tomase la decisión de la implementación de una planta de producción independiente, es necesario considerar que la misma no podría estar en funcionamiento todo el año, dado las fechas de siembra y cosecha del algodón y debido a que las plantas desmotadoras operan un mínimo de 100 días al año pudiendo ascender hasta 150 días como máximo (ver punto 3.2.1).

En ambos escenarios (producción de biochar dentro de las plantas desmotadoras o en empresa independiente), será necesario realizar una evaluación de impacto ambiental que permita considerar todas las interacciones ambientales y sociales que un proyecto como este tendría.

En lo que respecta al uso del producto final, en primer lugar es importante subrayar que para que cualquier material se considere una materia prima apta para la producción de biochar y, por lo tanto, también para su aplicación al suelo, será necesario elaborar un procedimiento riguroso para evaluar las características de la materia prima así como también del biochar generado y la dinámica a largo plazo en la gama de suelos, otras condiciones ambientales y los factores de uso y ordenación de la tierra que se deberán tener en cuenta para su aplicación.

Una evaluación eficaz de la estabilidad y la movilidad del biochar en el medio ambiente es primordial, incluida la forma en que éstas se ven influidas por factores relacionados con las características

fisicoquímicas del biochar, las condiciones de pirólisis y los factores ambientales, en particular cuando se considera su viabilidad como instrumento de secuestro del carbono y como enmienda orgánica. Para comprender bien la contribución que el biochar puede aportar a la mejora de los procesos y el funcionamiento del suelo es preciso conocer el alcance y las consecuencias de los cambios que el biochar experimenta en el suelo.

Los cambios físicos y químicos del biochar a lo largo del tiempo tiene repercusiones en su solubilización, lixiviación, movilización a través del perfil del suelo y en los sistemas de agua, así como en las interacciones con otros componentes del suelo (Verheijen et al., 2010). Hasta ahora, la pérdida de biochar y la movilidad ambiental se han cuantificado escasamente en los estudios llevados a cabo por diferentes grupos de investigación y esos procesos siguen siendo poco conocidos. Además, existe escasa información sobre la contribución de las prácticas de ordenación del suelo y los efectos de los diferentes climas y los cambios que éstos están experimentando debido al calentamiento global, junto con la posibilidad de un aumento en la erosión como mecanismos claves que controlen el destino final del biochar en el suelo.

Ese conocimiento debe derivarse de estudios a largo plazo que abarquen una amplia gama de condiciones del suelo y factores climáticos, utilizando al mismo tiempo métodos normalizados para simular el envejecimiento del biochar y para la vigilancia ambiental a largo plazo.

Es fundamental asegurar que las funciones y los procesos del suelo, así como la calidad del agua, no se pongan en peligro como consecuencia de la aplicación de biochar, lo que tendría graves consecuencias sanitarias, ambientales y socioeconómicas. Por estos motivos será necesario llevar a cabo pruebas experimentales con diferente duración a lo largo del tiempo y en diferentes tipos de tierra antes de la decisión de una producción a gran escala.

Para evaluar la Sostenibilidad de esta propuesta, como se muestra en la Figura 3.8, se deben tomar en cuenta los tres pilares fundamentales que se integran en ella: Económico, Ambiental y Social.

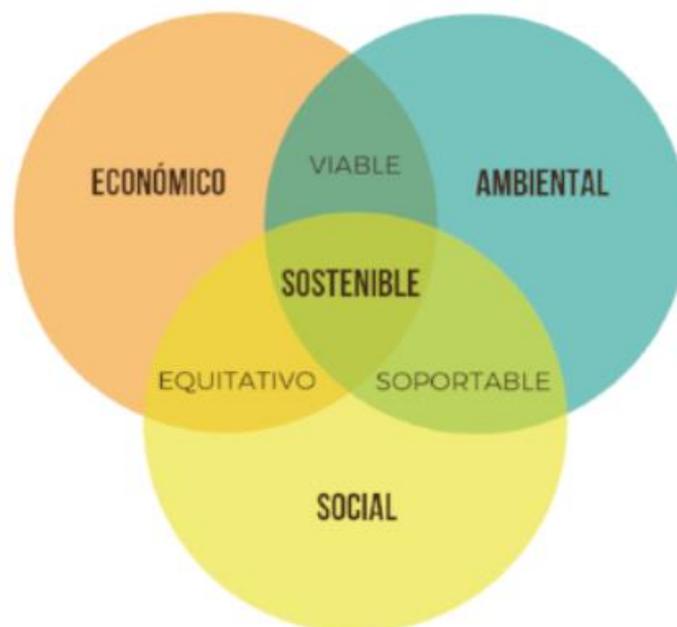


Figura 3.8: Pilares de la sostenibilidad.

Fuente: [www.sostenibilidad.com](http://www.sostenibilidad.com)

El valor económico potencial para los agricultores podría derivarse del aumento del rendimiento de los cultivos, aunque también pueden obtenerse beneficios económicos adicionales, en forma de reducción de los costos de producción de algodón, mediante la disminución de la aplicación de fertilizantes. Los costos de riego también podrían reducirse potencialmente si la aplicación de biochar da lugar a una mayor capacidad de retención de agua.

Además de los beneficios económicos para los usuarios, como se mencionó anteriormente, las empresas desmotadoras (en el caso de que sean ellas las que produzcan el biochar) o nuevas empresas productoras de biochar podrían tener ganancias económicas tras la producción y comercialización del producto. Sin embargo, sería necesario realizar un análisis de mercado y financiero que permita determinar los beneficios reales que este proyecto representaría.

Ya se han mencionado en reiteradas ocasiones a lo largo del desarrollo del presente estudio los beneficios ambientales que la propuesta podría traer aparejados, como ser un aumento en la fertilidad de los suelos y una mejora en sus características, así como su utilización para el secuestro de carbono.

En lo que respecta a la esfera social, la creación de nuevos puestos de trabajo y el aporte para el desarrollo de las economías locales serían factores potenciales por desarrollar.

Todo lo mencionado anteriormente debe ser pensado y desarrollado a través de la vinculación entre organismos e instituciones tanto públicas como privadas, contando con el apoyo de gobiernos locales, provinciales y nacionales, los cuales deben fomentar investigaciones y desarrollos regenerativos que permitan mejorar la sostenibilidad agraria. La interacción y la interdependencia de las políticas y las diferentes disciplinas involucradas exigen una evaluación holística y sistémica de las oportunidades y los escollos que presenta la producción y posteriores usos de biochar como enmienda orgánica.

## 4 CONCLUSIONES

---

**D**el estudio de caso efectuado se pudo comprender el sistema de producción de algodón en Argentina de forma global, detectándose que durante el mismo se generan anualmente grandes cantidades de residuos orgánicos en la etapa de desmote, los cuales no tienen un destino final definido. La falta de normativa en cuanto a la disposición de estos residuos hace que cada empresa decida y gestione los residuos generados según su voluntad y sus posibilidades, generando en muchas ocasiones problemas ambientales tras la quema o falta de gestión de los mismos.

A través de la información bibliográfica analizada, se estudiaron y comprendieron los diferentes procesos de producción de biochar, así como los parámetros requeridos para que el biochar producido pueda ser aplicado para la mejora en la productividad del suelo, seleccionándose el proceso productivo más favorable (pirólisis).

Asimismo, fue posible conocer y comprender de manera teórica (a partir de estudios realizados por grupos de investigación de otros países) las características de los residuos de desmote y de esta manera se analizó y predijo su influencia sobre las propiedades del biochar que se podría generar a partir de éstos.

En base a toda la información bibliográfica analizada en relación a las condiciones de proceso y las características de la materia prima, se puede concluir que la valorización del residuo en forma de biochar para su utilización como enmienda orgánica representa una alternativa viable. Esto se ha podido comprobar a través de los balances de materia y energía simulados a partir de datos bibliográficos, alcanzando un alto rendimiento másico del producto deseado.

Sin embargo, para poder efectuar cálculos y simulaciones más precisas, sería necesario poder contar con los resultados de análisis físicos y químicos de muestras reales de residuos de desmote provenientes de las desmotadoras situadas en la zona geográfica seleccionada lo cual no fue posible obtener durante el desarrollo de este trabajo.

Tras el desarrollo del presente trabajo se pudo detectar que la producción de biochar es aún una actividad en progreso y evolución. Aunque se ha demostrado su utilidad para mejorar el valor agronómico y ambiental de los suelos agrícolas en ciertos estudios piloto con condiciones ambientales limitadas, todavía no se ha alcanzado un consenso científico sobre los beneficios agronómicos y ambientales del biochar a largo plazo.

Cada estudio analizado fue realizado en condiciones específicas, y es difícil generalizar sus resultados debido a la naturaleza variable de las materias primas, su disponibilidad local, la variabilidad del biochar resultante y las características físicas y biológicas inherentes a los lugares definidos para su aplicación, así como la variabilidad de las prácticas agronómicas a las que podría estar expuesto. En este sentido, quedan aun muchas incertidumbres y puntos sin respuestas a la hora de afirmar que el mismo no tendrá impactos negativos sobre los suelos en los que se aplique.

Por último, se considera que para que la aplicación del biochar para la agricultura y el medio ambiente sea beneficiosa, debe integrarse como parte de un conjunto de medidas de conservación del suelo destinadas a aumentar la capacidad de recuperación del sistema agroambiental combinado con el secuestro de carbono. Para ello, será importante el análisis de las condiciones y características locales que permitan identificar las estrategias que mejor se adapten al sitio específico.

## 5 REFERENCIAS

---

- Agblevor, F. A., Mingle, W. L., & Cundiff, C. (2006). Storage and characterization of cotton gin waste for ethanol production. *Resources, Conservation and Recycling*, 46(2), 198-216. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.07.002>
- Agblevor, F. A., Trumbo, J., & Batz, S. (2003). Composition and ethanol production potential of cotton gin residues. *Applied Biochemistry and Biotechnology; Totowa*, 105(1-3), 219-230. <http://dx.doi.org/10.1385/ABAB:105:1-3:219>
- Al Afif, R., Sean Anayah, S., & Pfeifer. (2020). Batch pyrolysis of cotton stalks for evaluation of biochar energy potential. *Renewable Energy*, 147, 2250-2258. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.146>
- Allesina, G., Pedrazzi, S., Allegretti, F., Morselli, N., Puglia, M., Santunione, G., & Tartarini, P. (2018). Gasification of cotton crop residues for combined power and biochar production in Mozambique. *Applied Thermal Engineering*, 139, 387-394. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.115>
- Alper, K., Tekin, K., & Karagoz, S. (2017). Pyrolysis of agriculture wastes for bio-oil and char production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 124, 369-372. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.12.021>
- Álvarez, R., Rubio, G., & Álvarez, C. (2012). *Fertilidad de suelos: Caracterización y manejo en la Región Pampeana*. Editorial Facultad de Agronomía.
- Andrade, F. (Ed.). (2017). *Los desafíos de la agricultura argentina: Satisfacer las futuras demandas y reducir el impacto ambiental*. Presidencia de la Nación, Ministerio de Agroindustria, INTA, Dirección Nacional Asistente de Información, Comunicación y Calidad.
- Argento, R., Ciucio, M. M., & Ferreyra, J. (2018). Influencia del Tratamiento de Desechos Lignocelulósicos sobre las Propiedades de Aglomerados Basados en Residuos de Algodón. *Revista Tecnología y Ciencia*, 32, 98-106.

- Bachmann, L., Daniele, C., Mereb, J., & Frassetto, A. (2007). *Identificación expeditiva de los principales problemas ambientales en el 'Gran Chaco' argentino*. Universidad de Buenos Aires - Instituto de Geografía. <https://ced.agro.uba.ar/gran-chaco/sites/default/files/pdf/Problemas%20amb%20en%20el%20gran%20chaco%20argentino.pdf>
- Basu, P. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory* (Second Edition). Elsevier. <https://ebookcentral-proquest-com.us.debiblio.com/lib/uses/detail.action?pq-origsite=primo&docID=1319046>
- Bela, D. (2017a). *Jornada de Actualización del Cultivo de Algodón*. Jornada de Actualización del Cultivo de Algodón, AER – GENERAL PINEDO CHACO. [https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta-bela\\_usos\\_subproductos\\_desmote\\_0.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta-bela_usos_subproductos_desmote_0.pdf)
- Bela, D. (2017b). *Caracterización de la biomasa proveniente del desmote de Algodón*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Belmonte, D. R. Z. (2017). *Valorización de biocarbones obtenidos mediante pirólisis de residuos orgánicos*. 112.
- Benavente, V., Calabuig, E., & Fullana, A. (2015). Upgrading of moist agro-industrial wastes by hydrothermal carbonization. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 113, 89-98. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.11.004>
- Bergman, P., Boersma, A., Zwart, R., & Kiel, J. (2005). *Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations*. Energy Research Centre of the Netherlands, Energy Research Centre of the Netherlands, Energy Research Centre of the Netherlands. [https://www.researchgate.net/profile/Robin\\_Zwart/publication/204978559\\_Torrefaction\\_for\\_Biomass\\_Co-Firing\\_in\\_Existing\\_Coal-Fired\\_Power\\_Stations/links/09e41511c9aaf0e1c7000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Robin_Zwart/publication/204978559_Torrefaction_for_Biomass_Co-Firing_in_Existing_Coal-Fired_Power_Stations/links/09e41511c9aaf0e1c7000000.pdf)
- Bolan, N., Novak, J., Sik Ok, Y., & Tsang, D. C. W. (2019). *Biochar from Biomass and Waste: Fundamentals and Applications*. Elsevier.
- Cely Parra, P. A. (2016). *Evaluación del uso de residuos orgánicos para la producción de biochar y su aplicación como enmienda orgánica* [PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid].

<https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.44393>

- Delssin, E. A. (2013). *Tendencias algodoneras en Argentina: Análisis desde un enfoque prospectivo de los principales parámetros que definen la actividad* (1a edición). Ediciones INTA. [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-tendencias\\_algodoneras\\_en\\_argentina\\_\\_anlisis\\_desde\\_un.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-tendencias_algodoneras_en_argentina__anlisis_desde_un.pdf)
- Díaz, M. J., Madejón, E., López, F., López, R., & Cabrera, F. (2002). Composting of vinasse and cotton gin waste by using two different systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 34(4), 235-248. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(01\)00109-4](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00109-4)
- Division of Agriculture and Natural Resources*. (s. f.). Recuperado 18 de octubre de 2020, de <https://ucanr.edu/>
- Elena, M. G., Piedra, D. R., & D'Angelo, M. L. (2008). *Cadena agroindustrial del algodón (Primera etapa)*. INTA Centro Regional Chaco-Formosa.
- FAO, & ICAC. (2015). *Measuring sustainability in cotton farming systems towards a guidance framework: Report*. <http://www.fao.org/documents/card/en/c/c2658c57-5edd-4bd2-bc0d-024ccd8a9785/>
- FAOSTAT. (2020). <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>
- Fiallos Ortega, L. R., Flores Mancheno, L. G., Duchi Duchi, N., Flores Mancheno, C. I., Baño Ayala, D., & Estrada Orozco, L. (2015). *Restauración ecológica del suelo aplicando biochar (carbón vegetal), y su efecto en la producción de Medicago sativa*. 12, 13-20.
- Guy, D. J. (2000). «El Rey Algodón». Los Estados Unidos, la Argentina y el desarrollo de la industria algodonera argentina. *Mundo Agrario*, 1, 22.
- IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change. (2020). <https://www.ipcc.ch/>
- Jahirul, M. I., Rasul, M. G., Chowdhury, A. A., & Ashwath, N. (2012). Biofuels Production through Biomass Pyrolysis -A Technological Review. *Energies; Basel*, 5(12), 4952-5001. <http://dx.doi.org/10.3390/en5124952>
- Jeoh, T., & Agblevor, F. A. (2001). Characterization and fermentation of steam exploded cotton gin waste. *Biomass and Bioenergy*, 21(2), 109-120. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(01\)00028-9](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(01)00028-9)

- Kambo, H. S., & Dutta, A. (2015). A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 359-378. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.050>
- Khan, M. A., Wahid, A., Ahmad, M., Tahir, M. T., Ahmed, M., Ahmad, S., & Hasanuzzaman, M. (2020). World Cotton Production and Consumption: An Overview. *Cotton Production and Uses*, 1-7. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-1472-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-15-1472-2_1)
- Kruse, A., Funke, A., & Titirici, M.-M. (2013). Hydrothermal conversion of biomass to fuels and energetic materials. *Current Opinion in Chemical Biology*, 17(3), 515-521. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2013.05.004>
- Lee, J., Sarmah, A. K., & Kwon, E. E. (2019). Production and Formation of Biochar. *Biochar from Biomass and Waste*, 3-18. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811729-3.00001-7>
- Lehmann, J. (2009). Terra Preta Nova – Where to from Here? En W. I. Woods, W. G. Teixeira, J. Lehmann, C. Steiner, A. WinklerPrins, & L. Rebellato (Eds.), *Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision* (pp. 473-486). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9031-8\\_28](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9031-8_28)
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. Routledge.
- McLaughlin, H., Anderson, P. S., Shields, F. E., & Reed, T. B. (2009). *All Biochars are Not Created Equal, and How to Tell Them Apart*. North American Biochar Conference, Boulder, CO.
- Ministerio de Hacienda de la Nación Argentina. (2017). *Informe de Cadena de Valor Algodonera -Textil* (Informes de Cadenas de valor N.º 28). Secretaría de Política Económica. Subsecretaría de Programación Microeconómica. [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sspmicro\\_cadena\\_de\\_valor\\_algodon\\_textil.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sspmicro_cadena_de_valor_algodon_textil.pdf)
- Muñoz, S., & Luis, J. (2019). *Valorización de biomasa residual: Biocarbones como soportes catalíticos* [Universidad de Sevilla]. <https://idus.us.es/handle/11441/89702>
- Paytas, M. J., & Ploschuk, E. L. (2013). Algodón. En E. B. de la Fuente, A. Gil, P. I. Gimenez, A. G. Kantolic, M. Lopez Pereira, E. L. Ploschuk, D. M. Sorlino, P. Vilariño, D. F. Wassner, & L. B. Windauer (Eds.),

*Cultivos Industriales*. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.

- Piccioni, J., Gordo, J. P., Sanchez, A., Barolin, B., & Carrasco, M. F. (2012). *Producción de elementos constructivos basados en residuos del desmote del algodón*. II Jornadas de Investigación en Ingeniería del NEA y países limítrofes, Chaco, Argentina. <http://frre.utn.edu.ar/IJCyT/clean/files/get/item/2166>
- Pietro, M. O. (2016). *Efectos del biochar sobre el suelo, las características de la raíz y la producción vegetal* [Http://purl.org/dc/dcmitype/Text, Universidad de Córdoba]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=63944>
- Portal de Suelos de la FAO*. (2020). Propiedades Químicas | Portal de Suelos de la FAO | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>
- Primaz, C. T. (2018). *Valorização de resíduos agroindustriais de café e algodão para produção de bio-óleo e biochar*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Qian, K., Kumar, A., Zhang, H., Bellmer, D., & Huhnke, R. (2015). Recent advances in utilization of biochar. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1055-1064. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.074>
- Rebolledo, A. E., López, G. P., Moreno, C. H., Collado, J. L., Alves, J. C., Pacheco, E. V., & Barra, J. D. E. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 34(3), 367-382.
- Schmidt, H. P., Bucheli, T., Kammann, C., Glaser, B., Abiven, S., Leifeld, J., & Hagemann, N. (2012). *Guidelines: European Biochar Certificate for a sustainable production of biochar*. Ithaka Institute.
- Semilla de algodón* | FEDNA. (s. f.). Recuperado 2 de mayo de 2020, de [http://www.fundacionfedna.org/ingredientes\\_para\\_piensos/semilla-de-algod%C3%B3n](http://www.fundacionfedna.org/ingredientes_para_piensos/semilla-de-algod%C3%B3n)
- Senasa. (2018, junio 11). Argentina.gob.ar. <https://www.argentina.gob.ar/senasa>
- Simon, C. P. (2012). *Impacto del algodón en surco estrecho sobre la problemática del empleo en el sector algodonero del sudoeste chaqueño*. INTA. <https://inta.gob.ar/documentos/impacto-del-algodon-en-surco-estrecho-sobre-la-problematica-del-empleo-en-el-sector-algodonero-del-sudoeste-chaqueno>

- Sistema Nacional Argentino de Vigilancia y Monitoreo de plagas. (2020). *Gossypium hirsutum*.  
<https://www.sinavimo.gov.ar/cultivo/gossypium-hirsutum>
- Skordilis, A. D. (1992). Combustion of cotton gin residues in a lime kiln reactor. *Bioresource Technology*, 40(3), 241-244. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(92\)90149-R](https://doi.org/10.1016/0960-8524(92)90149-R)
- Tag, A. T., Duman, G., Ucar, S., & Yanik, J. (2016). Effects of feedstock type and pyrolysis temperature on potential applications of biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 120, 200-206. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.05.006>
- Tejada, M., & Gonzalez, J. L. (2003). Effects of the application of a compost originating from crushed cotton gin residues on wheat yield under dryland conditions. *European Journal of Agronomy*, 19(2), 357-368. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00089-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00089-8)
- Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A. C., van der Velde, M., & Diafas, I. (2010). *Biochar application to soils: A critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions*. Office for the Official Publications of the European Communities. Luxembourg.
- Villalba, S. B. O. (2010). *Parque Desmotador de la República Argentina 2010*. 37.
- Wang, S., Dai, G., Yang, H., & Luo, Z. (2017). Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 62, 33-86. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.05.004>
- Wanjura, J. D., Barnes, E. M., Kelley, M. S., Holt, G. A., & Pelletier, M. G. (2014). Quantification and characterization of cotton crop biomass residue. *Industrial Crops and Products*, 56, 94-104. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.02.019>
- Xinyan, H., Zhaoxia, L., Wenjuan, N., LiYang, T., Di, Q., Zhiyou, N., & Qiaoxia, Y. (2018). Effects of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of gas and biochar obtained from pyrolysis of crop residues. *Energy*, 143, 746-756. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.062>
- Zabaniotou, A. A., Roussos, A. I., & Koroneos, C. J. (2000). A laboratory study of cotton gin waste pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 56(1), 47-59. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(00\)00088-7](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(00)00088-7)

Zheng, H., Wang, Z., Deng, X., Zhao, J., Luo, Y., Novak, J., Herbert, S., & Xing, B. (2013). Characteristics and nutrient values of biochars produced from giant reed at different temperatures. *Bioresource Technology*, 130, 463-471. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.044>