

# Trabajo Fin de Grado

Diseño de un proceso para el aprovechamiento de residuos agrícolas en la industria del papel.

English title:

Design of a process for the use of agricultural residues in de pulp and paper industry.

Autor

Ana Quetglas Querol

Director

Pablo González Miguel

Alberto Gonzalo Callejo

Titulación del autor

Grado en Ingeniería Química

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER



Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
Universidad Zaragoza

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe entregarse en la Secretaría de la EINA, dentro del plazo de depósito del TFG/TFM para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. Ana Quetglas Querol ,en

aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)

(Título del Trabajo)

"Diseño de un proceso para el aprovechamiento de residuos agrícolas en la industria del papel."

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 18 de Noviembre de 2020

Fdo: Ana Quetglas Querol



## **RESUMEN**

En el ciclo de vida del papel a partir de papel recuperado (fibras secundarias), las fibras se degradan a causa de los crecientes ciclos de reciclado. Para evitar la pérdida de las propiedades mecánicas y empeoramiento de la calidad del papel, se introducen fibras vírgenes y otros aditivos. Por ello en este trabajo se hizo el estudio de la introducción de tres residuos agrícolas, uno procedente del cultivo de lechuga, otro que es paja de cereal y un tercero procedente de la producción de zumo de naranja. El papel recuperado se ha considerado como fuente de celulosa para el papel reciclado y será su aplicación final el aprovechamiento de los residuos. Se probó la adición de los residuos en su estado original y la lechuga y paja sometidas adicionalmente a un tratamiento de deslignificación previo a su introducción en distintos porcentajes. Los porcentajes de adición fueron del 5%, 10%, 20% y 40% en peso seco para la lechuga y la paja, y del 20% para la naranja. Se caracterizaron tanto las distintas mezclas de pasta de papel como las hojas de papel de laboratorio elaboradas con los residuos y se compararon los resultados de sus propiedades con las hojas de papel sin adición de residuo. Como conclusión se obtuvo que era viable la adición de paja sin tratamiento y de lechuga deslignificada en pequeños porcentajes, ya que se lograba mantener las propiedades del papel sin afectar a su porosidad e incluso se mejoraban algunas. Finalmente se realizó un diseño del diagrama de bloques con los principales balances de materia correspondientes al proceso en el que se podría incluir a estos dos residuos al papel para cartón de embalaje, estimándose la cantidad anual que podría ser aprovechada por esta vía de cada uno de ellos.

## ÍNDICE

1.	Introducción y objetivos	7
2.	Antecedentes	8
2.1	Producción de pasta a partir de fibras vegetales.	8
2.2	Producción de pasta a partir de papel recuperado (fibras secundarias).	9
2.3	Producción de papel a partir de la pasta de celulosa.	10
3.	Materiales y métodos	14
3.1	Materiales	14
3.1.1	Caracterización de los residuos	14
3.2	Pretratamiento de los residuos	15
3.3	Deslignificación de los residuos	16
3.4	Fabricación de las hojas de papel e incorporación de los residuos	16
3.4.1	Elaboración de la pasta de papel	16
3.4.2	Formación de las hojas de papel	17
3.4.3	Tipos de hojas de papel elaboradas	20
3.5	Caracterización de la pasta de papel	21
3.5.1	Ensayo Schopper – Riegler (SR)	21
3.6	Caracterización de las hojas de papel	22
3.6.1	Gramaje	22
3.6.2	Espesor	22
3.6.3	Densidad	23
3.6.4	Permeancia al aire Gurley	23
3.6.5	Resistencia a la tracción	24
3.6.6	Ensayo de compresión en corto (SCT)	25
3.6.7	Ensayo de resistencia al estallido	25
3.6.8	Ensayo COBB 60''	26

Residuos agrícolas en la industria del papel	Ana Quetglas
3.6.9    Ensayo de resistencia a la compresión en anillo (RCT)	27
4.    Resultados	28
4.1    Caracterización de los residuos	28
4.2    Humedad de los residuos tras la deslignificación	28
4.3    Caracterización de la pasta de papel	28
4.3.1    Ensayo Schopper-Riegler (SR)	29
4.4    Caracterización de las hojas de papel	30
4.4.1    Aspecto visual	33
4.4.2    Densidad	34
4.4.3    Permeancia al aire Gurley	34
4.4.4    Ensayo de tracción	36
4.4.5    Índice de compresión en corto (SCT)	38
4.4.6    Índice de resistencia al estallido	39
4.4.7    COBB 60''	40
4.4.8    Índice de compresión RCT	41
5.    Diseño de proceso	42
6.    Conclusiones	45
7.    Bibliografía	46
ANEXO I: Imágenes de las formetas elaboradas.	48
ANEXO II: Otros resultados del ensayo de resistencia a la tracción.	50

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Composición y nomenclatura de las formetas. ....	21
Tabla 2: Poder calorífico y porcentaje de humedad de las materias primas .....	28
Tabla 3: Resultados del porcentaje de humedad tras la deslignificación. ....	28
Tabla 4: Cantidades de mezcla para cada grupo.....	29
Tabla 5: Índices SR. ....	29
Tabla 6: Tabla de resultados .....	31
Tabla 7: Tabla de resultados 2. ....	32
Tabla 8: Otros parámetros obtenidos en el ensayo de tracción. ....	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema del proceso llevado a cabo en el trabajo. ....	12
Figura 2: Objetivos 9, 12 y 13 de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas.....	13
Figura 3: Imágenes de los residuos agrícolas utilizados (a) paja, b) lechuga, c) naranja). ....	14
Figura 4: Residuo de lechuga hidratado.....	15
Figura 5: Pulper y pasta de papel en la elaboración. ....	17
Figura 6: Tamiz y gránulos sólidos del residuo de lechuga .....	18
Figura 7: Agitador mecánico. ....	19
Figura 8: Proceso en el formador (1. Cilindro, 2. Agitado, 3. Calmado, 4. Formeta húmeda). ..	19
Figura 9: Proceso de secado.....	20
Figura 10: Equipo de medida del índice SR. ....	22
Figura 11: Micrómetro electrónico. ....	23
Figura 12: Equipo de medida de permeabilidad al aire Gurley.....	24
Figura 13: Mordazas de medida de tracción en el papel .....	24
Figura 14: Mordazas de ensayo de compresión en corto. ....	25
Figura 15: Equipo de medida de la resistencia al estallido .....	26
Figura 16: Equipo de ensayo COBB 60". ....	27
Figura 17: Equipo de ensayo RCT y utensilio de forma de anillo. ....	27
Figura 18: Imágenes de los grupos de formetas. ....	33
Figura 19: Caracterización de las formetas. Densidad. ....	34
Figura 20: Caracterización de las formetas. Permeancia al aire Gurley.....	35
Figura 21: Caracterización de las formetas. Permeancia al aire Gurley ampliada. ....	35
Figura 22: Caracterización de las formetas. Módulo de Young.....	36
Figura 23: Caracterización de las formetas. Índice de tracción.....	37
Figura 24: Caracterización de las formetas. Porcentaje de alargamiento.....	37
Figura 25: Caracterización de las formetas. Índice SCT.....	38
Figura 26: Caracterización de las formetas. Índice de estallido.....	39
Figura 27: Caracterización de las formetas. Cobb 60". ....	40
Figura 28: Caracterización de las formetas. Índice RCT. ....	41
Figura 29: Diagrama del proceso para la lechuga deslignificada al 7% en peso. ....	43
Figura 30: Diagrama del proceso para la paja al 5% en peso.....	44
Figura 31: Formetas de paja al 5, 10 y 40%.....	48
Figura 32: Formetas de lechuga al 5, 10 y 40%. ....	48
Figura 33: Formetas de paja deslignificada al 5, 10 y 40%. ....	48
Figura 34: Formetas de lechuga deslignificada al 5, 10 y 40%. ....	48

## 1. Introducción y objetivos

La industria papelera en España, como fabricante de celulosa y papel, tiene un efecto importante en la economía, constituyendo el 4,5% del PIB y el 18,5% del empleo industrial, habiéndose alcanzado una producción de papel en el país de 6.5 millones de toneladas en 2019. España representa un 7% de la producción total europea siendo el sexto productor de papel de la UE (1). Esta industria es uno de los referentes de la economía circular ya que usa en un alto porcentaje materias primas locales, renovables y reciclables.

El 71% del papel que consumimos es recogido y utilizado para reciclaje tras su uso, siendo el objetivo para este año 2020 alcanzar el 74%, de modo que España se pueda convertir en el país con la mejor tasa de reciclaje en Europa, utilizando 5,2 millones de toneladas anuales de papel usado como materia prima (2). El papel recuperado se ha convertido en una importante fuente para la industria papelera contribuyendo a la sostenibilidad de la economía y medio ambiente, llegando a suponer actualmente más del 50% de la materia prima utilizada en la industria del papel a nivel mundial (3).

Con los progresivos reciclados en el proceso de producción de papel a partir de fibras secundarias (papel reciclado), están se van degradando (4) y es necesario añadir fibras vírgenes para mantener y evitar la pérdida de las propiedades mecánicas del papel y su disminución de calidad. Para ello se ha probado la introducción de residuos agrícolas como la paja (5) o miscanthus (6), entre otros, como fuente de celulosa adicional.

El principal objetivo de este trabajo es llevar a cabo un estudio preliminar sobre el efecto de la introducción de algunos residuos agrícolas, como son la lechuga y la paja de trigo, recogidos y pretratados por una start-up local, al proceso de producción de papel a partir de fibras secundarias . Para conocer el efecto de la incorporación de estos materiales se han elaborado hojas de ensayo (formetas) a partir de papel reciclado (con y sin adición residuos) en las que se han medido sus propiedades, para comparar resultados. Estos residuos se han introducido al natural (sin tratamiento posterior) y tras una deslignificación que ha eliminado parte de la lignina que contienen estas materias. Se ha probado la introducción de los residuos en porcentajes del 5, 10, 20 y 40% en peso, además de un blanco sin residuo como referencia para las propiedades que tendría el papel sin los aditivos.

Además, se ha probado la introducción de otro residuo agrícola con base de naranja, procedente de la industria de la producción de zumos, en un porcentaje del 20% para comparar también con los anteriores.

## 2. Antecedentes

El papel es un material compuesto principalmente por fibras de celulosa, ya que el origen último de la materia prima que se emplea es vegetal. Estas fibras de celulosa se encuentran en la pared celular, donde están enlazadas con hemicelulosa en una matriz de lignina que tiene función de soporte. La celulosa tiene una estructura de un azúcar (la  $\beta$ -D-glucosa) que puede unirse entre sí hasta 1500 unidades. Dependiendo de la materia prima utilizada existen fibras cortas de 0,7-1,8 mm y fibras largas de 2,5-4,5 mm de longitud (7).

En la actualidad existen principalmente dos tipos de materias primas alternativas para la producción de papel, que dan lugar a dos tipos diferentes de producción de pastas: las que producen papel a partir de fibras vegetales, localizadas en la madera de árboles, en las hojas o en los tallos de algunas plantas, y las que lo producen a partir de papel reciclado. En ambos casos el proceso productivo industrial se divide en dos partes: producción de la pasta y producción del papel.

### 2.1 Producción de pasta a partir de fibras vegetales.

En este proceso se parte de las fibras vegetales que se someten a un tratamiento, con el objetivo de obtener una suspensión de fibras de celulosa en agua (8). Para ello los materiales se someten inicialmente a un corte o picado para adaptar el tamaño y que no provoquen problemas de operabilidad. Después se someten a una limpieza que elimina las impurezas y posibles contaminantes por vía seca o húmeda. (6,9).

En una etapa posterior, se retira parcialmente la lignina y se separan las fibras, mediante tres posibles métodos: mecánico, químico o semiquímico.

El proceso de obtención de pasta más simple es el mecánico y consiste en la molienda del material para convertirlo en una masa fibrosa mediante un molino de muelas ajustables que somete a las fibras a esfuerzos de cizalla cíclicos (7). Este proceso, permite obtener unas fibras dañadas, menos resistentes y con impurezas, aunque con altos rendimientos ya que una parte importante de la lignina permanece con la celulosa. Principalmente se emplea para papel de periódico, o para revistas y papel de libros de baja calidad. (10,11). Una variante de este es el proceso termomecánico en el que los residuos son calentados con vapor y luego pasados por el

proceso de refinado, cuyo objetivo es producir una ampliación de la superficie de las fibras, de modo que pueda aumentarse el número de enlaces con otras fibras.

En el procedimiento alcalino o químico, denominado “Kraft”, se consigue eliminar la lignina hasta en un 95% y se suele denominar como “deslignificación” empleándose como reactivo una mezcla de sulfuro de sodio e hidróxido sódico. La pasta que se obtiene tiene una gran resistencia debido a la calidad y longitud de las fibras, aunque es oscura y posteriormente se blanquea. Una alternativa de este proceso es el proceso sulfito, combinado con presión y temperatura (10). El proceso sulfito hace uso de una solución ácida de bisulfito de calcio o bisulfito de magnesio en digestión a 140/170°C, condiciones en las que el dióxido de sulfuro y el bisulfito convierten la lignina en un lignosulfonato soluble. Este proceso ya está prácticamente desaparecido en los países occidentales ya que es muy contaminante.

El tercer tipo de procesos son los semiquímicos. El proceso denominado como el proceso “a la sosa” es un método semiquímico menos agresivo que los procesos químicos, que normalmente se lleva a cabo a 100 °C y presión atmosférica con NaOH como reactivo (5,12). En el caso del proceso semiquímico, el tratamiento intermedio sólo es capaz de disolver la lignina parcialmente, dando lugar a una liberación parcial de las fibras, aunque esta lignina queda debilitada y puede ser parcialmente eliminada con un proceso mecánico posterior. El rendimiento es del 65-80%, mayor que el proceso químico que es del 40%. Como se ha comentado, se usa principalmente hidróxido de sodio como agente reactivo para conseguir la solubilización de parte de la lignina original y la hidrólisis de la hemicelulosa que contiene la materia prima. Se obtienen fibras con buena rigidez y moldeabilidad (11). Entre sus ventajas se encuentra la posibilidad de usar temperaturas y presiones más bajas (95-100°C, 1 bar) en comparación con los procesos químicos como el Kraft, además del uso de reactivos libres de azufres (13).

De los tres tipos de procesos utilizados para la producción de pasta a partir de vegetales, en este proyecto se va utilizar el proceso semiquímico a la sosa, ya que es el óptimo cuando se va a trabajar con una materia prima vegetal no maderera como es el caso de los residuos agrícolas.

## 2.2 Producción de pasta a partir de papel recuperado (fibras secundarias).

La otra alternativa para la producción de pasta y papel es la elaboración de pasta de celulosa con papel recuperado, que precisa de tratamientos previos de la materia prima para la



eliminación de las impurezas y de la tinta que contiene, además de refinar y/o dispersar la pasta. (8). Entre las ventajas que ofrece el uso de papel recuperado está el hecho de que permite mejorar la protección de recursos forestales aprovechando al máximo la fibra de celulosa. Adicionalmente, reduce la cantidad de productos de desecho sólidos y sus respectivos costes de gestión, además implica importantes ahorros de energía y agua en comparación con los procesos que sólo involucran fibras vírgenes. El reciclado del papel también tiene un impacto positivo al medio ambiente sobre los gases de efecto invernadero, ya que evita la emisión de metano al almacenar el papel de desecho en el vertedero y reduce las emisiones de dióxido de carbono de la tala de árboles (14,15). Como contrapartida, en cada ciclo de reciclado se pierden del 15-20% de fibras largas además de que las fibras existentes se acortan provocando una mayor rigidez del papel, y una disminución de las propiedades mecánicas. Así, a diferencia de lo que sucede con otros materiales reciclables como el aluminio o el vidrio, se estima que solo es posible realizar 5 o 6 ciclos de reciclado en el papel recuperado, siendo necesario introducir porcentajes de fibras vírgenes de celulosa, junto con aditivos, para el refuerzo de las propiedades mecánicas (16,17)

Habitualmente, los aditivos que se añaden a la pasta, previamente a la formación de la hoja, suelen ser derivados del petróleo, o productos alimentarios, como el almidón, cuyo uso es controvertido al tratarse de un producto que es muy utilizado para otras finalidades primarias. Por ello se va a estudiar la adición de los residuos industriales y su incorporación al papel promoviendo su reutilización, ya que además suponen una fuente de fibra virgen. De hecho, los biorresiduos de industrias agrícolas tienen una gran ventaja, comparados con otras fuentes de celulosa, como son sus bajos costes (o incluso negativos), además de que puede ayudar a resolver el problema de la gestión de dichos desechos que tienen las empresas. Así, la posible utilización de residuos agrícolas como aditivos para el papel puede producir un gran beneficio ya que dan una segunda vida a un producto residual, uno de los principios de la economía circular, y pueden disminuir la necesidad del uso del almidón (18).

### 2.3 Producción de papel a partir de la pasta de celulosa.

La fabricación de papel a partir de la pasta obtenida tanto de fibras vírgenes como recicladas consiste en ir retirando el agua de una suspensión de estas, mediante distintas etapas sucesivas como son el desgote por gravedad, vacío, presión, y el secado térmico. La fase final de acabado es la presentación del producto en bobinas para su posterior transformación en cartón

ondulado, papel cortado para imprimir, servilletas, papel higiénico, etc. A escala industrial se precisa de maquinaria de grandes dimensiones y compleja tecnología (8).

En este trabajo se va a estudiar el efecto sobre el papel para embalaje de la adición de tres tipos de residuos agrícolas, con el objetivo de conseguir el aprovechamiento de estos residuos sin que se vea afectada la calidad del papel. Para ello se van a llevar a cabo dos grados de pretratamiento diferentes de los residuos:

- Por un lado, se adicionará el material o residuo original en distintas proporciones tras una limpieza y trituración
- por otro lado, se adicionará el material o residuo tras ser sometido a deslignificación mediante el proceso semiquímico con sosa como se ha expuesto anteriormente.

Existen en la bibliografía algunos estudios sobre la utilización de residuos agrícolas en el sector papelerero. Fahmy y colaboradores (5) hicieron estudios acerca de la utilización de paja de arroz para su introducción como aditivo en la pasta de papel tras un proceso de deslignificación similar al planteado en este trabajo. Debido a su estructura micro-porosa y su bajo contenido en lignina, la paja de arroz es fácil de blanquear y añadir a la pasta de papel ya que se necesita un consumo menor a la mitad de hidróxido de sodio que con otros residuos agrícolas. El principal inconveniente de su uso es la generación de un licor negro como producto de desecho, muy contaminante, y que contiene los químicos del proceso imposibles de recuperar debido al elevado nivel de sílice en el arroz. Por esta razón su uso para este fin ha decrecido debido a las estrictas leyes medio ambientales.

La introducción de paja de trigo como aditivo al papel también se ha estudiado por diversos autores al tratarse de un residuo muy abundante y que no siempre puede ser aprovechado. Hernández y colaboradores (19) sometieron la paja a un procedimiento "a la sosa" (con NaOH a temperatura de 98 °C y presión de 1 atm) libre de sulfatos y se compararon distintas alternativas de blanqueado libre de cloros TCF (en una etapa con peróxido de hidrógeno y perborato de sodio, y en dos etapas, la primera con perborato de sodio y la segunda con peróxido de hidrógeno). Con la incorporación de este material, los autores consiguieron mejoras en las propiedades mecánicas de la hoja, excepto el índice de estallido y la blancura, cuando utilizaron el proceso en dos etapas. En este caso, también se producen lejías negras que contienen productos de degradación de la lignina e hidrólisis de la celulosa que por motivos legales deben ser depuradas y reutilizadas en posteriores cocciones (20).

La aplicación de distintos residuos agrícolas (procedentes de la obtención de guisantes, pimientos, espárragos, okra y haba) como materia prima para la industria de papel para embalaje (13) ha sido también estudiada y se han comparado los resultados obtenidos. Tras la trituración estos residuos fueron procesados en un digestor donde se produjo el tratamiento semiquímico con una solución acuosa de NaOH (3 horas, 98°C, 1 atm). Al producto se le retiró el licor que lo acompañaba, se lavó y se refinó. Como resultado se obtuvieron mejoras en la mayor parte de las propiedades mecánicas de los papeles respecto a los obtenidos sólo con fibras recicladas, salvo en el caso de la resistencia a tracción y rotura que resultaron inferiores, excepto en el caso de los residuos de okra. De los distintos residuos usados, se obtuvieron mejores resultados de propiedades mecánicas finales con la okra y las habas.

El principal objetivo de este trabajo es estudiar la adición de dos residuos agrícolas, uno que ya ha sido empleado, como la paja, y otro que hasta el momento no ha sido utilizado como es la lechuga, para conseguir un aprovechamiento industrial de los mismos y analizar los resultados. Además, se han comparado dos grados de pretratamientos de los materiales, utilizando un proceso semiquímico para deslignificar los residuos agrícolas, frente al uso de estos de forma original sin tratamiento. De esta forma se pretende poder comprobar si estos residuos agrícolas industriales podrían ser aprovechados en el proceso sin suponer una pérdida de la calidad y propiedades del papel elaborado. Adicionalmente, se ha realizado un único ensayo con un residuo de naranjas procedente de la producción industrial de zumos.

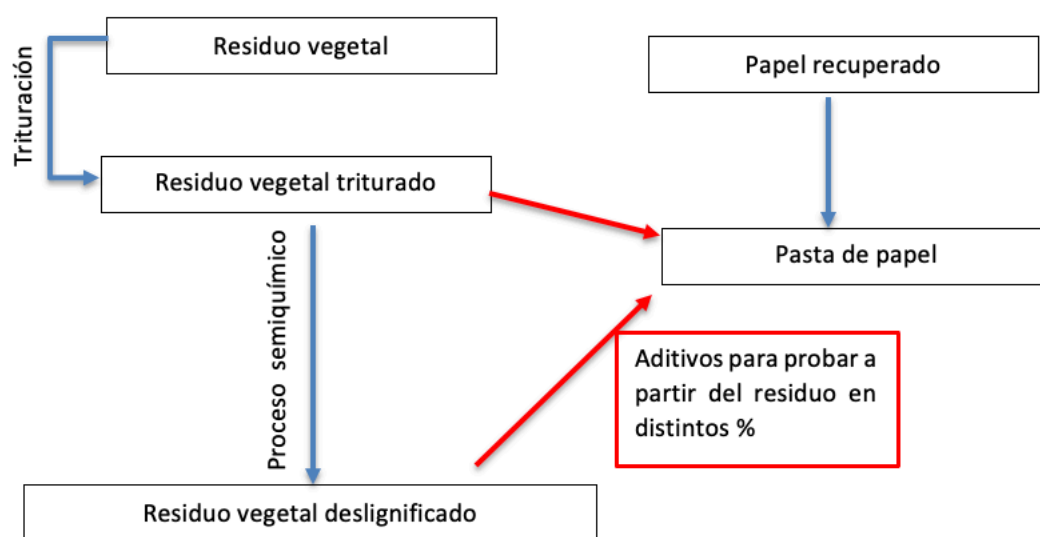


Figura 1: Esquema del proceso llevado a cabo en el trabajo.

En la *Figura 1* se muestra el diagrama con los pasos y procesos que se realizaron en el trabajo a partir de las materias primas empleadas.

De esta forma, este trabajo se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas (21) número 9, 12 y 13, mostrados en la *Figura 2*.

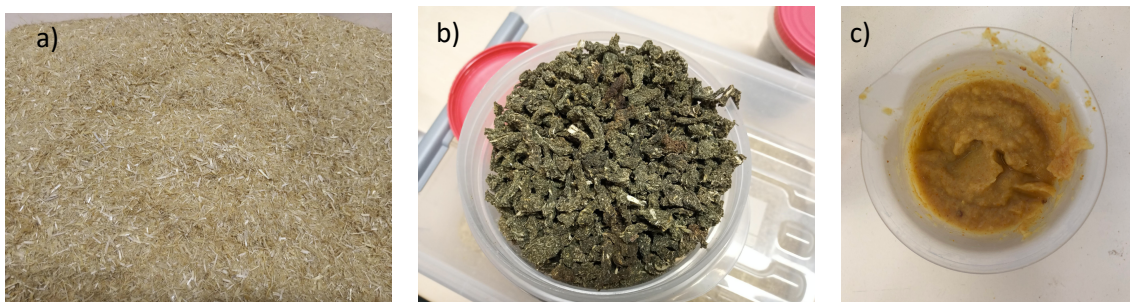


*Figura 2: Objetivos 9, 12 y 13 de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas.*

### 3. Materiales y métodos

#### 3.1 Materiales

Los materiales que se han probado como aditivos para el papel son principalmente dos residuos procedentes de la empresa Feltwood, S.A. de Zaragoza. Se trata de residuos agrícolas del procesado de vegetales, en concreto paja de cereal y restos de la producción de lechuga desecados, sometidos en la empresa a un pretratamiento previo del que no se dio información debido a que se encuentra actualmente en proceso de patentado. Adicionalmente, también se ha probado el uso y aprovechamiento de una pequeña muestra de residuo procedente de la elaboración industrial de zumo de naranja. Con este último material no pudieron realizarse un número de pruebas similares a las de los otros materiales por la pequeña cantidad del mismo proporcionada. Estos residuos se muestran en la *Figura 3*.



*Figura 3: Imágenes de los residuos agrícolas utilizados (a) paja, b) lechuga, c) naranja).*

En la deslignificación de los residuos se utilizó como reactivo de sosa (NaOH) de Sigma-Aldrich de una pureza del 98% y agua destilada.

Para la elaboración de la pasta de papel recuperado se utilizó papel reciclado de calidad 1.05.01 según la norma UNE-EN 643:2014. Como agente retentivo en la mezcla de pasta para la fabricación de las formetas se introdujo poliacrilamida catiónica (PAM-c) cuyo nombre comercial es FennoPol K 6330 T de KEMIRA, diluida con agua desionizada de calidad mili-Q. Tanto en el formador como para la elaboración de las mezclas de pasta de papel se empleó agua de la red de abastecimiento de aguas de Zaragoza.

##### 3.1.1 Caracterización de los residuos

Para la caracterización de estos residuos se sometieron a distintas pruebas de medida de sus propiedades, utilizando alrededor de 20 gramos de cada uno de los residuos para análisis. La

porción de 20 gramos de análisis de lechuga fue necesario molerla con un molino de cuchillas hasta que quedó con textura de polvo.

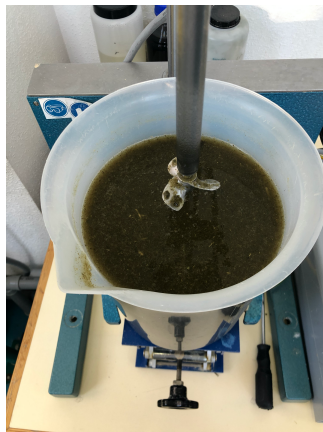
Se realizó un análisis inmediato de las muestras de materia prima en la que las cenizas se determinaron según la norma UNE EN-ISO 32004-84. También se midió el poder calorífico en una bomba calorimétrica según la norma UNE 164001. El contenido de humedad se midió según estipula la norma UNE-EN 14774-1. Adicionalmente se midió el contenido en volátiles de las materias primas siguiendo la norma UNE 32019. Del residuo de naranja solo se analizó su contenido en humedad.

### 3.2 Pretratamiento de los residuos

De forma previa a la producción del papel fue precisa la preparación de los residuos a introducir en la mezcla de pasta de papel.

La paja se sometió inicialmente a un proceso de cribado con un tamiz de 1 mm de luz nominal para separar la fracción más pequeña, que fue la introducida directamente al papel como residuo original y siendo la fracción más grande la que se utilizó en el proceso de deslignificado. El residuo de lechuga se dividió en dos partes, una mitad se usó para su introducción sin tratamiento y la otra mitad se sometió al deslignificado.

Para poder introducir y homogeneizar el residuo de lechuga original (sin tratamiento de deslignificación) en la pasta de papel, fue necesario hidratarlo previamente. Para ello se tomó toda una fracción de residuo de lechuga de 140 g y se mezcló con 4600 g de agua en un recipiente de 5 L y se trató durante 2 horas y 15 minutos en un equipo de dispersión (Dispermat, VMA) con un disco tipo hélice a 5500 rpm, para conseguir una suspensión de residuo de lechuga diluida sin grumos y homogénea (*Figura 4*), que se pueda mezclar con la pasta de papel.



*Figura 4: Residuo de lechuga hidratado.*

El residuo de naranja no precisó de ningún tratamiento previo a su introducción en la pasta.

### 3.3 Deslignificación de los residuos

Con el objetivo de aumentar el porcentaje de celulosa en la materia prima se sometió a una porción de los residuos de paja y lechuga a un proceso de deslignificado previo a su incorporación al papel para poder comparar los resultados con los de los residuos originales. La eliminación de lignina es una etapa habitual en los procesos de adición de otros residuos agrícolas al papel ya que puede producir un aumento en los enlaces entre fibras de celulosa al incorporarlos al papel, y mejorar las propiedades mecánicas del mismo.

La deslignificación se llevó a cabo en dos reactores de vidrio tipo mezcla perfecta de 1 L de capacidad. Para la deslignificación del residuo de paja se introdujeron 50 g en cada reactor junto con 700 mL de una disolución de sosa al 9% en peso respecto al residuo introducido (4,5g de NaOH), y se mantuvo con agitación constante y reflujo durante 3 horas (98°C y presión atmosférica). Con el residuo de lechuga se realizó el proceso análogo, pero introduciendo 80 g de residuo en cada reactor con 800 mL de la disolución de sosa al 9% respecto a la cantidad de residuo. (7,2 g de NaOH).

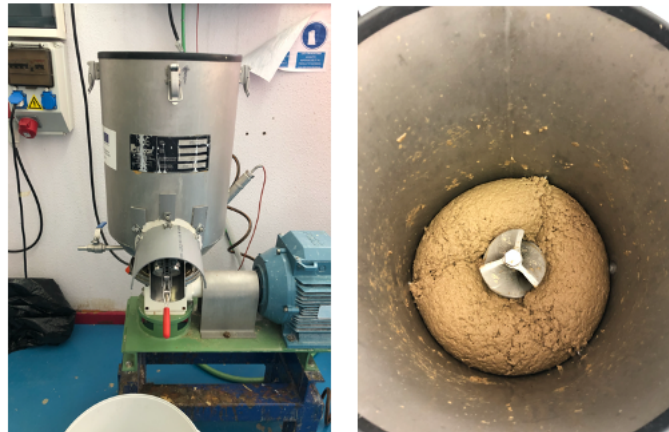
Al finalizar la deslignificación los productos resultantes fueron filtrados al vacío, lavados con agua y secados en la estufa (Gallenkamp) a 40°C.

### 3.4 Fabricación de las hojas de papel e incorporación de los residuos

#### 3.4.1 Elaboración de la pasta de papel

Como se ha comentado anteriormente, para la elaboración de la pasta de papel se utilizó como materia prima papel recuperado de calidad 1.05.01, que se cortó en trozos de unos 50 x 50 mm y se introdujeron en un desintegrador en húmedo de laboratorio (pulper) de rotor helicoidal (de marca LICAR), junto con agua hasta una relación del 1:10 en peso de papel y agua respectivamente. En este equipo, encargado de deshacer el papel y mezclarlo homogéneamente con el agua gracias a la hélice de su parte inferior, se sometió la mezcla a varios ciclos a 750 rpm entre los cuales se comprobaba el estado de la pasta y que no se produjesen obstrucciones. En total el tiempo de trabajo fue de 25 minutos.

En la *Figura 5* se puede observar el pulper y el resultado de la pasta de papel obtenida como materia prima principal.



*Figura 5: Pulper y pasta de papel en la elaboración.*

#### 3.4.2 Formación de las hojas de papel

Para la formación de las hojas de papel recuperado o de papel recuperado con aditivos se siguió la norma UNE-EN-ISO 5269-2.

El paso previo fue la preparación de las disoluciones de residuo para adicionar a la pasta de papel recuperado. Por lo que se refiere a la paja, se calculó la cantidad necesaria para todos los tipos de papel a elaborar y se disolvió con la cantidad correspondiente de agua para conseguir una concentración de sólidos en cada disolución del 3,45 %. Después se introdujo el residuo diluido en un desintegrador con cuchillas rotativas durante 1 hora y 15 minutos al nivel 3 de velocidad.

La parte de ambos residuos sometida al proceso de deslignificación también necesitó una hidratación posterior y una dispersión para conseguir una pasta homogénea, que fuese más fácil de mezclar con el papel recuperado.

Con la lechuga deslignificada se procedió de igual manera que con la paja. Tras la hidratación se observó que la suspensión continuaba teniendo unos gránulos sólidos y duros de lechuga que permanecían en la suspensión por lo que fue preciso tamizar la mezcla diluida con agua mediante un tamiz de luz nominal de 2,5 mm para desecharlos como se muestra en la *Figura 6*. Posteriormente se adicionó la cantidad de agua necesaria para preparar diluciones de fibra al 3.45%.





*Figura 6: Tamiz y gránulos sólidos del residuo de lechuga*

Para la introducción del residuo de naranja no fue preciso someterlo a ningún proceso previo, se calculó la cantidad necesaria a introducir en la pasta para conseguir el peso seco que se decidió ensayar y se añadió.

Adicionalmente, antes de introducir cada mezcla de papel recuperado y residuo al formador de hojas se le añadieron 20 mL de agente retentivo. Este se preparó en una disolución de 0,05% en peso con agua mili-Q. Este tipo de productos, que se adicionan habitualmente en la producción industrial de papel, favorecen que las fibras y cargas minerales de pequeño tamaño que contiene la pasta no se pierdan al retirar el agua y queden retenidas durante el proceso de formación de la hoja.

El proceso de formación de las hojas de ensayo de papel fue el mismo para todos los casos, con los distintos residuos y en las distintas proporciones. Se partió de la pasta de papel húmeda elaborada tal y como se indica en el apartado 3.3.1, se mezcló en un recipiente de 5L con la cantidad correspondiente de residuo de acuerdo con los cálculos elaborados y se llenó de agua hasta los 4,5 kg. Esta mezcla se llevó nuevamente al equipo de dispersión con el disco con forma de hélice a 500 rpm durante 10 min, hasta que la mezcla estuvo homogeneizada. Se realizó un mezclado final que garantizaba que las alícuotas para la producción de cada hoja de muestra (formeta) tuviesen un contenido de sólidos similar y fuese una mezcla homogénea.

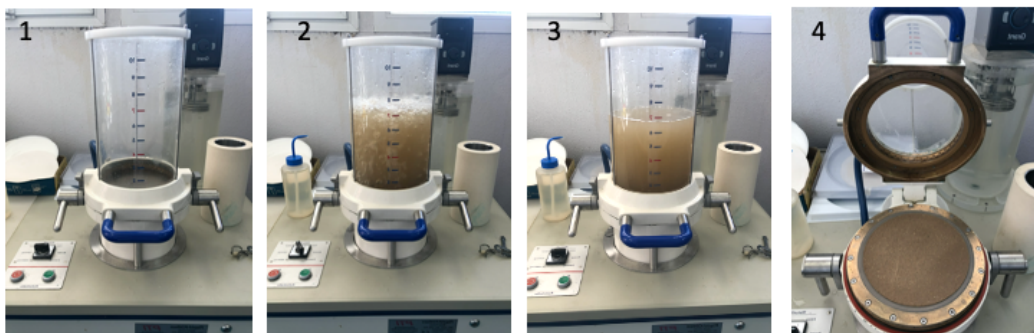
Para el cálculo de las cantidades necesarias para cada formeta de la mezcla de pasta de papel y residuo a utilizar se tuvo en cuenta que el gramaje (peso por cada  $m^2$  de papel) óptimo a conseguir es de  $130 \text{ g/m}^2$ , por lo que, dadas las dimensiones del formador de hoja, cada formeta fabricada debía tener un peso de 3,85 gramos secos para ser apta, con una tolerancia de 0,2 g (entre 3,65 - 4,05 g). El gramaje seleccionado se encuentra en la zona media del rango de gramajes utilizados en la fabricación de papel para embalaje.

Para la formación de una hoja se tomaron la cantidad calculada de la mezcla en un vaso de precipitados de volumen 500 mL, a esta muestra se le añadieron 20 mL del agente retentivo preparado y se agitó a velocidad mínima durante 10 segundos con un agitador mecánico (RW 20 digital, IKA), tal y como puede verse en la *Figura 7*.



*Figura 7: Agitador mecánico.*

Tras este mezclado final, el material se introduce en el formador de hojas. Este formador consta de un cilindro en cuyo fondo hay una malla metálica muy tupida. La mezcla se introdujo en el cilindro donde se siguieron los pasos de llenado con agua, agitación, reposo y succión del agua a través de la malla. Al final del ciclo se obtuvo la pasta húmeda y compacta con la forma de la hoja sobre la malla, que se retiró del formador y se colocó entre dos papeles absorbentes. Cada formeta se introdujo en el secador de vacío a 94°C durante 6 minutos. En las *Figuras 8 y 9* se muestra el formador en sus distintas etapas y la parte de secado de las hojas de papel.



*Figura 8: Proceso en el formador (1. Cilindro, 2. Agitado, 3. Calmado, 4. Formeta húmeda).*



Figura 9: Proceso de secado.

Después del secado se retiraron los papeles absorbentes y cada hoja se introdujo en la estufa (Hotbox oven de marca Gallenkamp) a 105°C durante 10 minutos. Cuando la formeta estaba seca se pesó para comprobar que su peso estaba dentro de los límites aceptables establecidos por la norma.

### 3.4.3 Tipos de hojas de papel elaboradas

De acuerdo con el objetivo final del trabajo de comparar las propiedades del papel con la adición de los residuos en distintas proporciones, se decidió adicionar los 4 tipos distintos de residuos (paja y lechuga originales y deslignificados) en proporciones del 5%, 10%, 20% y 40% en peso seco a la pasta de papel recuperado. Adicionalmente, se probó la aplicación del residuo de naranja como aditivo del que se produjo un único tipo de papel con un 20% de residuo en peso seco, debido a la poca cantidad de muestra recibida.

Con el objetivo de analizar el efecto de la adición de los residuos se produjeron hojas obtenidas a partir de papel recuperado exclusivamente, denominadas blancos. Debido a que en el proceso se elaboró pasta de papel en dos veces, que pueden tener distintas características de humedad y composición, se utilizaron dos blancos. Las mezclas que se han hecho con cada una de dichas pastas se comparó con su blanco correspondiente. Así, los grupos con lechuga deslignificada se compraron con el blanco 2 y el resto con el blanco inicial.

Eso supuso un total de 19 tipos distintos de tipos de papel, produciéndose 12 formetas de cada uno para poder realizar las posteriores pruebas de caracterización y medida de propiedades. En total se fabricaron 228 hojas de papel con los distintos residuos y composiciones.

En la *Tabla 1* se muestra la nomenclatura que se usará para nombrar a cada grupo de formetas fabricadas.

*Tabla 1: Composición y nomenclatura de las formetas.*

<i>Residuo</i>	<i>Porcentaje de residuo</i>	<i>Nomenclatura</i>
<i>Blanco</i>	0%	B, B 2
<i>Naranja</i>	20%	N 20%
<i>Paja</i>	5, 10, 20, 40%	P 5, 10, 20 y 40%
<i>Lechuga</i>	5, 10, 20, 40%	L 5, 10, 20 y 40%
<i>Paja deslignificada</i>	5, 10, 20, 40%	PD 5, 10, 20 y 40%
<i>Lechuga deslignificada</i>	5, 10, 20, 40%	LD 5, 10, 20 y 40%

### 3.5 Caracterización de la pasta de papel

#### 3.5.1 Ensayo Schopper – Riegler (SR)

Como primer análisis se realizó el ensayo Schopper-Riegler para caracterizar las propiedades de desgote de la mezcla de pasta de papel recuperado con pasta de los residuos. Este análisis mide la facilidad que tiene una pasta de papel para perder agua y se relaciona con la producción que puede obtenerse con una determinada máquina de papel. Una mayor facilidad de desgote, indica mayor producción en máquina.

El ensayo Shopper - Riegler (SR), se ha realizado siguiendo la norma UNE-EN ISO 5267-1. Consiste en la introducción de una solución acuosa de 1 L con un contenido de 2 gramos secos de la pasta de papel en el embudo de tamaño estándar que tiene una malla metálica en la parte inferior y dos orificios, uno lateral y otro en el fondo. Al drenar la pasta en el embudo se forma una torta de fibras en la malla metálica de este.

La medida del resultado del ensayo SR viene dada por el volumen de líquido descargado por el orificio lateral en un recipiente de 1 L. Cuando no hay agua descargada en este recipiente, el índice SR es 100 e indica que es más difícil separar el agua de las fibras y que atravesase la maya del fondo, de modo que requeriría un mayor tiempo en la máquina productora de papel para poder obtener un papel con una humedad apta para el mercado. Si es al contrario, y el volumen descargado es 1 L, el índice SR es 0. El equipo empleado se muestra en la *Figura 10*.



Figura 10: Equipo de medida del índice SR.

### 3.6 Caracterización de las hojas de papel

Una vez formadas las hojas de papel se procedió a su caracterización mediante los distintos ensayos que se exponen a continuación. Previamente, las muestras se acondicionaron durante 1 día a condiciones de 23°C y una humedad relativa del 50%, dando lugar a una humedad del papel del 6 % aproximadamente.

#### 3.6.1 Gramaje

Corresponde a la medida del peso de 1 m<sup>2</sup> del papel producido. El cálculo del gramaje se realizó utilizando una balanza de precisión modelo CB Complet Carat de marca COBOS. Se realizó la medida en 10 formetas de cada tipo de papel producido tomando su peso. El valor del gramaje se obtiene utilizando la *Ecuación 1* que relaciona el peso de las muestras, donde “n” corresponde con las 10 formetas, y el denominador corresponde la superficie de las formetas que en este caso son de geometría circular, siendo “r” el radio de 0,1 m. Las medidas se realizaron siguiendo la norma UNE-EN ISO 536.

$$\text{Gramaje} \left( \frac{g}{m^2} \right) = \frac{\text{Peso total de } n \text{ formetas (g)}}{n \cdot \pi \cdot r^2 (m^2)} \quad [\text{Ecuación 1}]$$

#### 3.6.2 Espesor

Para la caracterización de las hojas de papel elaboradas se comenzó midiendo el espesor de las formetas utilizando un micrómetro digital (marca PTA). Las medidas se efectuaron siguiendo la norma UNE-EN ISO 534 en 10 muestras de cada uno de los 19 grupos elaborados.



Figura 11: Micrómetro electrónico.

En el equipo, que se muestra en la *Figura 11*, se introduce la hoja y esta es comprimida por una mordaza que se deja caer y mide la distancia entre los dos lados de la misma indicando la medida del espesor.

### 3.6.3 Densidad

Para obtener los valores de la densidad de cada tipo de papel producido se relacionan el gramaje y espesor medidos en cada grupo mediante la *Ecuación 2* y se obtiene el valor.

$$Densidad \left( \frac{kg}{m^3} \right) = \frac{gramaje \left( \frac{g}{m^2} \right) \cdot 10^{-3}}{espesor (m)} \quad [Ecuación 2]$$

### 3.6.4 Permeancia al aire Gurley

El método Gurley determina la permeancia al aire del papel midiendo el caudal medio que pasa a través de la muestra de papel bajo una determinada diferencia de presión y en una unidad de tiempo. El aire se comprime al pasar por un cilindro vertical superior que flota en aceite, y a medida que desciende el cilindro, el aire pasa atravesando el papel, tomándose medidas con un cronómetro del tiempo que le cuesta descender un volumen de 100 cm<sup>3</sup>. Para este ensayo se realizaron 10 medidas en cada grupo de muestras siguiendo la norma UNE-EN ISO 5636-5. Una medida de Gurley más baja implica mejor permeabilidad del aire o menor resistencia al mismo. Altas porosidades (bajos valores de Gurley) son deseables para conseguir una mejor impresión sobre el papel y un mejor pegado de etiquetas en el caso de papeles para embalaje (como es el caso).



Figura 12: Equipo de medida de permeabilidad al aire Gurley.

El valor de la medida resultante viene dado en unidades de segundos por 100 cm<sup>3</sup> de aire. El equipo usado para el ensayo se muestra en la *Figura 12*.

### 3.6.5 Resistencia a la tracción

El ensayo de resistencia a la tracción consiste en someter una probeta de papel a tracción hasta rotura con una velocidad constante de alargamiento de 100 mm/min. Se ajustan las mordazas a la longitud de ensayo inicial de 100 mm y se sitúan las probetas en las mordazas sujetadas mediante una presión de 2 bar sin someterlas a ninguna tensión significativa y paralela a la fuerza de tracción sometida, siguiendo la norma UNE-EN ISO 1924-2. Cuando la probeta se rompe se registra la fuerza máxima de tracción empleada. Se realizaron las medidas en 10 muestras de cada grupo cuyas probetas tenían una dimensión de 15 mm de ancho.



Figura 13: Mordazas de medida de tracción en el papel

El instrumento empleado (*Figura 13*) es una máquina universal de ensayos de marca Zwick Roell Z005 cuya célula de carga es de 5kN con el utillaje necesario para el ensayo de tracción en

el papel. A partir de este ensayo se obtienen varios parámetros característicos como: el módulo de Young, índice de tracción, el porcentaje de alargamiento, la carga de rotura, la energía absorbida durante la tracción (TEA) y la longitud de rotura.

### 3.6.6 Ensayo de compresión en corto (SCT)

El ensayo de compresión en corto (SCT) se realizó siguiendo la norma UNE-EN ISO 9895 y mide la compresión interna de las fibras de papel. Consiste en la introducción de una probeta de 15 mm de ancho entre dos mordazas que están espaciadas a 0,70 mm, que se fuerzan la una contra la otra hasta provocar un fallo de compresión. Se realizó con la misma máquina que el ensayo de tracción, pero usando el utillaje de compresión en corto que se muestra en la *Figura 14*.



*Figura 14: Mordazas de ensayo de compresión en corto.*

Se realizaron 10 medidas por tipo de papel. Para poder comparar el resultado de la medida entre grupos con distinto gramaje se calcula el índice SCT, dividiendo el valor de fuerza por metro entre el gramaje del grupo de muestras (Ecuación 3).

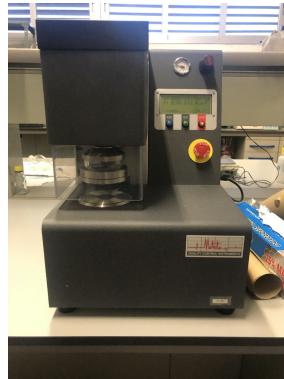
$$\text{índice SCT } \left( \frac{N \cdot m}{g} \right) = \frac{F \left( \frac{kN}{m} \right) \cdot 10^3 \left( \frac{N}{kN} \right)}{\text{gramaje } \left( \frac{g}{m^2} \right)} \quad [\text{Ecuación 3}]$$

### 3.6.7 Ensayo de resistencia al estallido

El ensayo para determinar la resistencia al estallido del papel consiste en colocar una muestra del papel a ensayar sobre un diafragma circular y sujeto por la periferia. Se somete el diafragma a un bombeo a velocidad constante de un fluido hidráulico (aire) con presión creciente hasta



que se rompe la probeta. La resistencia al estallido de la formeta es el máximo valor de la presión hidráulica aplicada. Se realizaron 10 medidas por grupo según la norma UNE-EN ISO 2759. El ensayo se llevó a cabo en el equipo de compresión para perforación que se muestra en la *Figura 15*.



*Figura 15: Equipo de medida de la resistencia al estallido*

Como resultado directo de la medida se obtiene la presión máxima medida en kPa. El índice de estallido se calcula dividiendo el valor de esta presión entre el gramaje, con unidades de  $\text{kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$  como se muestra en la *Ecuación 3*.

$$\text{índice de estallido} \left( \frac{\text{kPa}\cdot\text{m}^2}{\text{g}} \right) = \frac{P_{\text{max}}(\text{kPa})}{\text{gramaje} \left( \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right)} \quad [\text{Ecuación 4}]$$

El estallido es una medida que se relaciona con la resistencia de los papeles que están en la cara de las cajas de cartón al golpeo con elementos punzantes durante el transporte.

### 3.6.8 Ensayo COBB 60''

El método de ensayo COBB 60'' mide la cantidad de agua que puede ser absorbida por la hoja de papel en 60 segundos. Este ensayo se realiza siguiendo la norma UNE-EN ISO 535 y consiste en poner en contacto 100 mL de agua con la formeta en una superficie de  $100 \text{ cm}^2$  y durante 60 segundos. Para el ensayo se utilizan los instrumentos que se muestran en la *Figura 16*. El rodillo tiene peso y tamaños normalizados.

El resultado se expresa en  $\text{g}/\text{m}^2$  y viene dado por la diferencia de pesada de la formeta antes y después de poner en contacto la superficie del papel con el agua. Se realizaron 3 medidas por grupo con probetas de 14 cm de ancho y 14 cm de largo.

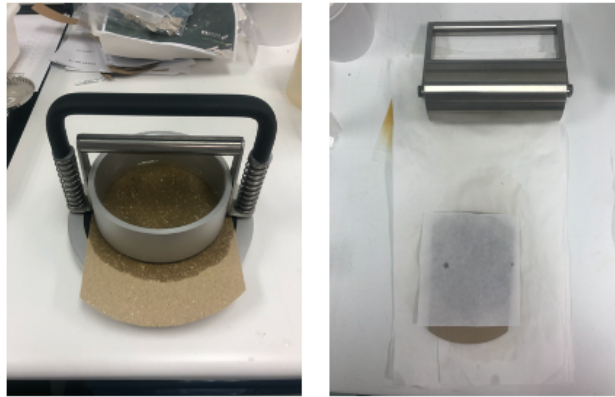


Figura 16: Equipo de ensayo COBB 60''.

En general son deseables bajos valores de COBB de modo que el papel tenga una menor tendencia a la absorción de agua.

### 3.6.9 Ensayo de resistencia a la compresión en anillo (RCT)

La resistencia a la compresión mediante el método del anillo se basa en la introducción de una probeta con dimensiones de 12,7 mm de ancho por 152,4 mm de largo en un utensilio redondo que la coloca con forma de anillo. Este se introduce en un equipo (Figura 17), donde se somete a una fuerza creciente de compresión sobre el borde, hasta que se produce el inicio del colapso. La resistencia a la compresión en anillo se calcula teniendo en cuenta la fuerza máxima y la longitud de la probeta.



Figura 17: Equipo de ensayo RCT y utensilio de forma de anillo.

Se realizaron 10 medidas para cada grupo siguiendo la norma UNE-EN ISO 12192. El índice de compresión en anillo se calcula dividiendo la resistencia por longitud entre el gramaje del grupo. Tanto este ensayo como el SCT están relacionados con la resistencia mecánica al apilamiento de las cajas que se pudieran producir con estos papeles.

## 4. Resultados

### 4.1 Caracterización de los residuos

Las propiedades características de cada uno de los residuos empleados en el trabajo se midieron según lo mencionado en el apartado 3.3 Caracterización de residuos. En los distintos análisis se obtuvieron los resultados de porcentaje en humedad de las muestras, poder calorífico, cantidad de cenizas y de volátiles que se muestran en la *Tabla 2*.

*Tabla 2: Poder calorífico y porcentaje de humedad de las materias primas*

<i>Residuo</i>	<i>Poder calorífico (kJ/kg)</i>	<i>Humedad (%)</i>	<i>Cenizas (%)</i>	<i>Volátiles (%)</i>
<i>Lechuga</i>	16905	8,8 ± 0,1	5,9 ± 0,5	18,4 ± 0,2
<i>Paja</i>	16632	6,68 ± 0,03	4,6 ± 0,3	17,9 ± 0,6
<i>Naranja</i>	-	94 ± 5	-	-

### 4.2 Humedad de los residuos tras la deslignificación

Posteriormente al tratamiento de deslignificación de los residuos de paja y lechuga se midió la humedad de los residuos tras su secado y estabilización. Los valores se muestran en la *Tabla 3*.

*Tabla 3: Resultados del porcentaje de humedad tras la deslignificación.*

	<i>Paja</i>	<i>Lechuga</i>
<i>Humedad (%)</i>	7 ± 1	0,72 ± 0,01

Como puede apreciarse, mientras que la paja mantuvo aproximadamente el contenido en humedad, en el caso de la lechuga esta se redujo drásticamente.

### 4.3 Caracterización de la pasta de papel

En la *Tabla 4* se muestran las cantidades empleadas de pasta de papel recuperado y de las pastas producidas para cada residuo por grupos distintos de papel. La cantidad por introducir de cada materia se calculó teniendo en cuenta los porcentajes de composición en peso seco deseados y las humedades de las materias primas.

Tabla 4: Cantidades de mezcla para cada grupo.

	<i>Pasta de papel (g)</i>	<i>Pasta de residuo (g)</i>		<i>Pasta de papel (g)</i>	<i>Pasta de residuo (g)</i>
<i>B</i>	625	0			
<i>N 20%</i>	500	215,83	<i>PD 5%</i>	593,75	86,95
<i>P 5%</i>	593,75	3,22	<i>PD 10%</i>	562,50	173,91
<i>P 10%</i>	562,50	6,43	<i>PD 20%</i>	500	347,82
<i>P 20%</i>	500	12,86	<i>PD 40%</i>	375	695,65
<i>P 40%</i>	375	25,72	<i>B 2</i>	546	0
<i>L 5%</i>	593,75	100	<i>LD 5%</i>	652,90	202,70
<i>L 10%</i>	562,50	200	<i>LD 10%</i>	618,50	405,41
<i>L 20%</i>	500	400	<i>LD 20%</i>	549,83	810,81
<i>L 40%</i>	375	800	<i>LD 40%</i>	412,40	1621,62

#### 4.3.1 Ensayo Schopper-Riegler (SR)

En la *Tabla 5* se encuentran los resultados obtenidos del ensayo Schopper-Riegler realizados a las mezclas de pasta de papel para cada grupo, que se relacionan con su capacidad de drenar o tiempo que cuesta eliminar el agua. Para mayores valores del índice SR implica menor capacidad de desgote.

Tabla 5: Índices SR.

	<i>B</i>	<i>P 5%</i>	<i>P 10%</i>	<i>P 20%</i>	<i>P 40%</i>	<i>L 5%</i>	<i>L 10%</i>	<i>L 20%</i>	<i>L 40%</i>	
<i>Índice SR</i>	36	37	41	40	31	45	49	54	62	
	<i>N 20%</i>	<i>PD 5%</i>	<i>PD 10%</i>	<i>PD 20%</i>	<i>PD 40%</i>	<i>B 2</i>	<i>LD 5%</i>	<i>LD 10%</i>	<i>LD 20%</i>	<i>LD 40%</i>
<i>Índice SR</i>	61	40	46	43	47	33	52	63	69	85

Como puede verse en la tabla, para los grupos con adición de paja, tanto con tratamiento de deslignificación como sin él, no se observa una tendencia clara, aunque no parece tener gran efecto la incorporación de este material sobre la pasta de papel ya que los valores de SR no son mucho mayores que en el blanco. Esto se debe principalmente a que las fibras que se

adicionaron son de mayor tamaño que en el caso de los otros residuos y no tienen un gran efecto en el desgote. En el caso de la lechuga, se observa un empeoramiento en el resultado del desgote a porcentajes de adición altos, que es incluso más acusado en el grupo del residuo de lechuga deslignificada. La adición del residuo de naranja también afecta al desgote, empeorando el valor de desgote de la pasta de papel. El efecto de estos dos últimos residuos es mayor con el aumento del porcentaje de incorporación.

En general se observa que la medida del desgote depende del grado de desfibrado del residuo en la pasta de papel, este es menor para la paja y mayor para la lechuga y la naranja.

#### 4.4 Caracterización de las hojas de papel

Habitualmente, en las medidas realizadas sobre materiales tan heterogéneos como el papel, es preciso realizar un número alto de replicas debido a la alta dispersión en los resultados. Así, en este trabajo se han realizado 10 medidas para la mayor parte de los ensayos. Solo se ha realizado un número menor en aquellos ensayos que requieren de una cantidad de muestra importante.

En las *Tablas 6 y 7* se muestran los resultados obtenidos para los distintos ensayos de caracterización de las hojas de papel, descritos en un apartado anterior (3.5 Caracterización de las hojas de papel). Los resultados se presentan con el intervalo de confianza del 90%.

Tabla 6: Tabla de resultados<sup>1</sup>

	<i>Gramaje</i> (g/m <sup>2</sup> )	<i>Espesor</i> (μm)	<i>Densidad</i> (kg/m <sup>3</sup> )	<i>Permeancia</i> <i>al aire Gurley</i> (s)	<i>Índice de</i> <i>estallido</i> (kPa m <sup>2</sup> /g)	<i>COBB 60''</i> (g/m <sup>2</sup> )
<b>B</b>	133	238 ± 7	556	23,4 ± 0,7	1,9 ± 0,1	266 ± 21
<b>N 20%</b>	133	243 ± 9	546	129 ± 4	0,7 ± 0,1	209 ± 15
<b>P 5%</b>	137	275 ± 9	501	21 ± 1	1,6 ± 0,1	281 ± 21
<b>P 10%</b>	142	293 ± 23	484	18 ± 1	1,5 ± 0,06	327 ± 11
<b>P 20%</b>	136	316 ± 10	431	12,5 ± 0,8	1,15 ± 0,07	335 ± 41
<b>P 40%</b>	134	376 ± 16	357	6,9 ± 0,3	0,74 ± 0,04	469 ± 37
<b>L 5%</b>	139	248 ± 6	558	31 ± 1	1,4 ± 0,1	254 ± 29
<b>L 10%</b>	137	262 ± 17	524	38 ± 4	1,41 ± 0,07	279 ± 16
<b>L 20%</b>	142	263 ± 19	541	68 ± 3	1,28 ± 0,07	220 ± 23
<b>L 40%</b>	124	273 ± 20	456	115 ± 9	1 ± 0,1	228 ± 17
<b>PD 5%</b>	137	235 ± 9	583	22,6 ± 0,7	1,75 ± 0,09	270 ± 12
<b>PD 10%</b>	136	242 ± 11	561	24 ± 1	1,7 ± 0,1	334 ± 9
<b>PD 20%</b>	140	255 ± 19	550	13,1 ± 0,6	1,26 ± 0,05	338 ± 27
<b>PD 40%</b>	136	261 ± 18	519	28 ± 2	1,1 ± 0,1	473 ± 15
<b>B 2</b>	133	201 ± 2	661	39 ± 0,9	2 ± 0,09	241,5 ± 15
<b>LD 5%</b>	137	226 ± 6	606	38,8 ± 2	2,22 ± 0,07	322 ± 3
<b>LD 10%</b>	136	221 ± 6	616	69 ± 2	2,1 ± 0,1	252 ± 2
<b>LD 20%</b>	135	227 ± 12	595	134 ± 4	2,1 ± 0,1	227 ± 7
<b>LD 40%</b>	132	187 ± 11	708	888 ± 26	2,28 ± 0,09	264 ± 21

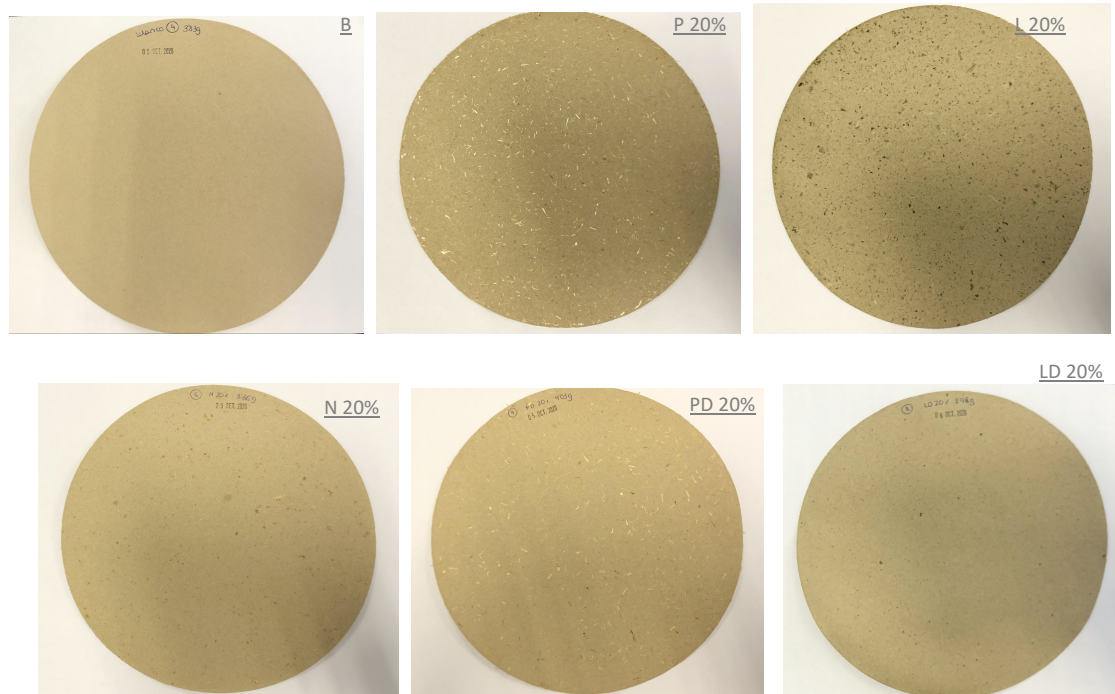
<sup>1</sup> Para el cálculo del intervalo de confianza al 90% de los ensayos se ha empleado la distribución de T-Student. En el ensayo Cobb 60'' se ha realizado con la desviación estándar según indica la norma.

Tabla 7: Tabla de resultados 2.

	<i>Modulo de Young (MPa)</i>	<i>Índice de tracción (N m/g)</i>	<i>Alargamiento (%)</i>	<i>índice SCT (N m/g)</i>	<i>índice RCT (N m/g)</i>
<i>B</i>	2280 ± 40	37 ± 2	2 ± 0,1	19,6 ± 0,8	8 ± 1
<i>N 20%</i>	1100 ± 153	36 ± 1	1,3 ± 0,2	23 ± 1	5,7 ± 0,7
<i>P 5%</i>	2150 ± 24	32 ± 1	1,8 ± 0,2	17,7 ± 0,3	7,3 ± 0,5
<i>P 10%</i>	1820 ± 221	25 ± 3	1,9 ± 0,4	16,8 ± 0,6	7,8 ± 0,5
<i>P 20%</i>	1230 ± 52	22 ± 1	1,5 ± 0,1	14 ± 1	6,3 ± 0,4
<i>P 40%</i>	1010 ± 64	13 ± 1	1,5 ± 0,1	12 ± 1	3,3 ± 0,3
<i>L 5%</i>	416 ± 48	29 ± 1	1,4 ± 0,2	17,8 ± 0,8	8,3 ± 0,8
<i>L 10%</i>	2050 ± 40	31 ± 1	1,6 ± 0,2	19,2 ± 0,8	8,7 ± 0,8
<i>L 20%</i>	1910 ± 78	28 ± 2	1,3 ± 0,2	17,3 ± 0,6	8,1 ± 0,4
<i>L 40%</i>	1900 ± 153	22 ± 2	1,1 ± 0,2	18,7 ± 0,6	5,6 ± 0,6
<i>PD 5%</i>	2320 ± 134	34 ± 3	1,8 ± 0,2	19,6 ± 0,6	7,6 ± 0,8
<i>PD 10%</i>	2210 ± 125	32 ± 3	1,5 ± 0,2	20 ± 1	8,3 ± 0,7
<i>PD 20%</i>	2220 ± 54	30 ± 2	1,3 ± 0,1	20,1 ± 0,9	6,7 ± 0,5
<i>PD 40%</i>	1830 ± 151	27 ± 2	1,2 ± 0,1	22 ± 2	7,6 ± 0,5
<i>B 2</i>	2590 ± 144	35 ± 2	2 ± 0,2	21,7 ± 0,6	9,9 ± 0,7
<i>LD 5%</i>	2480 ± 50	34 ± 2	1,6 ± 0,3	20,7 ± 0,8	8,6 ± 0,5
<i>LD 10%</i>	2450 ± 101	37 ± 3	2 ± 0,3	21,7 ± 0,4	9,2 ± 0,4
<i>LD 20%</i>	2470 ± 52	39 ± 2	2 ± 0,3	21,5 ± 0,3	8,9 ± 0,8
<i>LD 40%</i>	3360 ± 50	45 ± 1	2 ± 0,1	25 ± 1	9,6 ± 0,4

#### 4.4.1 Aspecto visual

En la *Figura 18* se muestra el aspecto de las formetas de cada grupo correspondientes a la incorporación de un 20% de residuo agrícola en composición y el blanco, en el *Anexo I* se encuentran las imágenes del resto de grupos y porcentajes en composición.



*Figura 18: Imágenes de los grupos de formetas.*

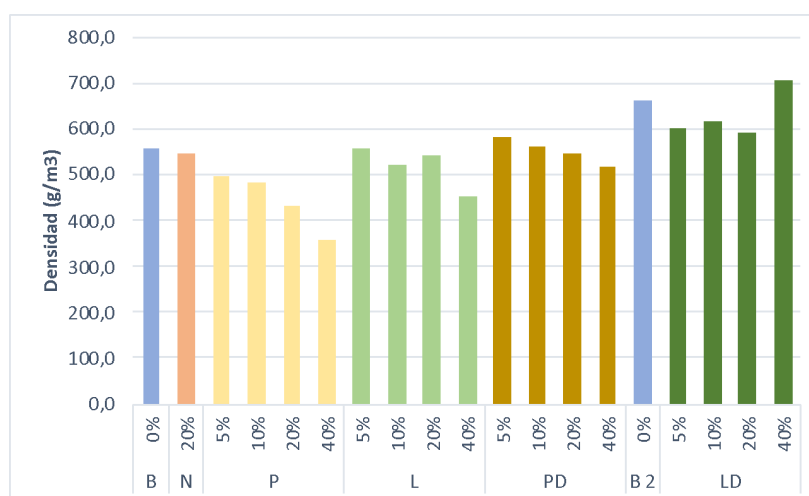
Como era previsible, en las imágenes se las hojas de papel se observa que a medida que aumenta el porcentaje de adición es más visible el efecto de la incorporación de estos materiales en el resultado final, sobre todo en el caso de la lechuga sin tratamiento. Su aspecto podría mejorarse sometiéndolas a un refinado posterior.

Sin embargo, es preciso comentar que los residuos con tratamiento de deslignificación consiguen un aspecto visual final más parecido al blanco. Las hojas a las que se incorporó un 5% de ambos materiales tras el tratamiento de deslignificación presentan un aspecto muy similar al de los blancos.



#### 4.4.2 Densidad

Los valores de las densidades varían entre 484 y 616 kg/m<sup>3</sup>. La densidad de las formetas realizadas con paja sin tratar tienen un valor más bajo que la media del resto de grupos, alcanzándose el menor de los valores con el mayor porcentaje de incorporación. Esto se debe a que el tamaño de las partículas de paja es mayor, y tienen una densidad más baja que la del papel, lo que afecta a la densidad media de los papeles producidos. Este mayor tamaño en las de las partículas de paja adicionada hace que la paja esté distribuida de manera menos uniforme que la lechuga de modo que es probable que su incorporación al papel afecte menos tanto positiva como negativamente, a las propiedades de los papeles producidos. En la *Figura 19* se muestra la figura con los resultados.



*Figura 19: Caracterización de las formetas. Densidad.*

Al contrario, ocurre con el grupo de la lechuga deslignificada al 40% en peso, que al tratarse de un material con un mayor grado de desfibrado se integra mejor en la mezcla con pasta de papel recuperado, dando lugar a un espesor ligeramente más bajo para el mismo gramaje. Su valor de densidad es el más alto al tratarse de formetas más densas y compactas. En el grupo de las formetas con naranja se obtienen valores de densidades parecidos a los del blanco.

#### 4.4.3 Permeancia al aire Gurley

Como se ha comentado, la permeancia al aire medida con el ensayo Gurley relaciona el tiempo que le cuesta a un determinado volumen de aire atravesar la hoja de papel y afecta también al desgote o capacidad de secado de estas, estando relacionado con el la porosidad de las formetas. En las *Figuras 20 y 21* se muestran las representaciones de los resultados obtenidos en el ensayo Gurley.

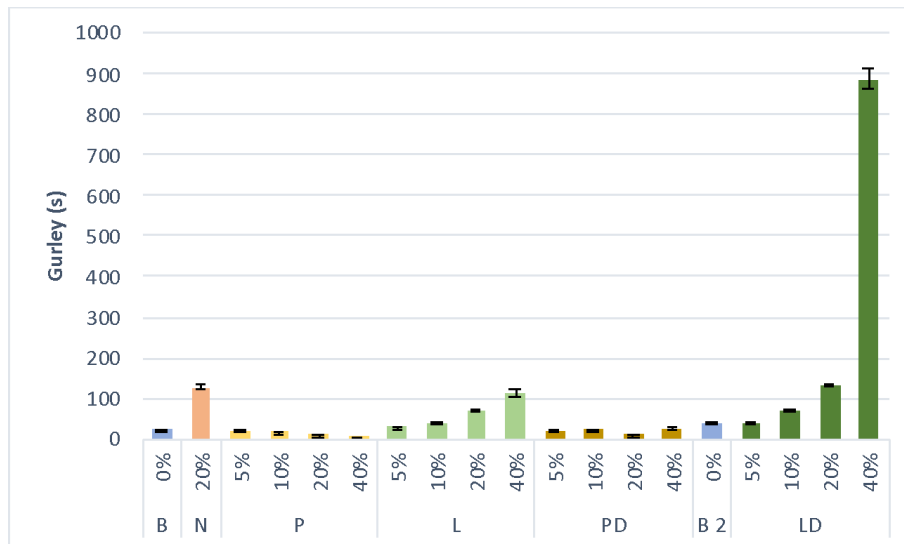


Figura 20: Caracterización de las formetas. Permeancia al aire Gurley.

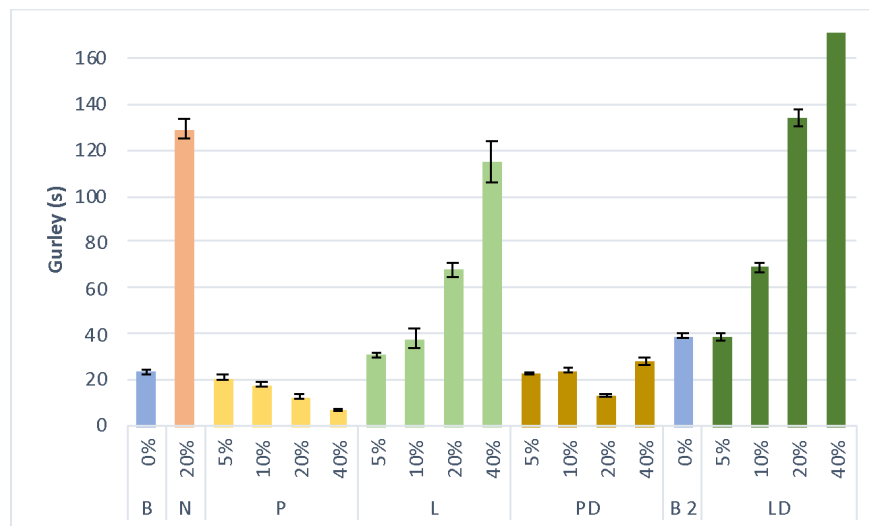


Figura 21: Caracterización de las formetas. Permeancia al aire Gurley ampliada.<sup>2</sup>

Los resultados varían desde 12 s hasta 134 s, a excepción del grupo de lechuga deslignificada al 40% que tiene un valor de 888 s. El blanco tiene un valor de 23,4 s y la naranja al 20% en peso de 129,2 s.

En los resultados se observa que a mayor introducción en peso de paja se produce una disminución del Gurley y por lo tanto las formetas tienen una mejor condición de permeancia de aire. El hecho de que se incorpore la paja en forma de partículas más grandes y menos homogéneas sobre las fibras recuperadas hace que la porosidad se vea menos afectada ya que el residuo no ocluye los poros que se forman al formarse el papel con las fibras secundarias. Este efecto de aumento de la porosidad no se ve tan claramente con la paja sometida al tratamiento

<sup>2</sup> Se ha ampliado la gráfica de la Figura 17 para poder observar el rango de valores de los grupos distintos a LD 40%.

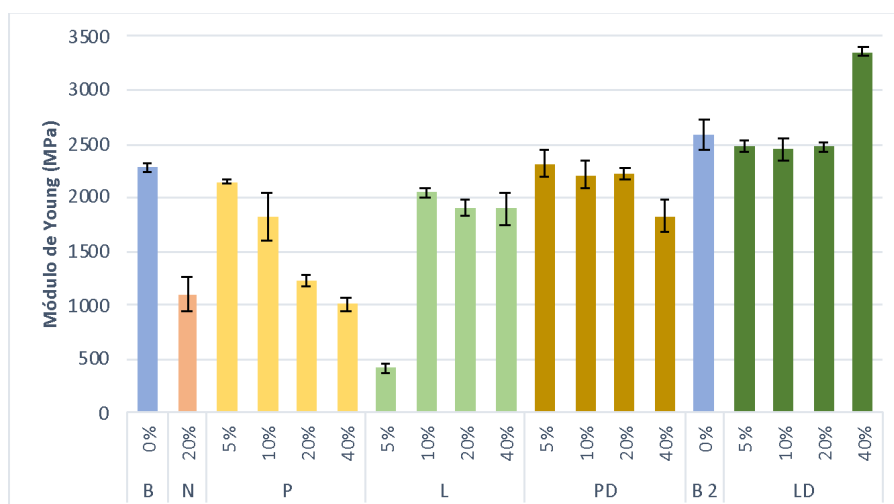
semiquímico, posiblemente debido al efecto de reducción de tamaño y separación de las fibras del tratamiento. Sin embargo, con la lechuga sucede lo contrario, ya que al aumentar la cantidad del residuo se consigue un peor paso del aire a través de la hoja de papel. En especial cabe destacar el resultado del grupo de la lechuga deslignificada al 40%. Puede verse que la adición de una alta cantidad del residuo dificulta mucho la permeación del aire debido a la oclusión de los poros que se forman en el papel recuperado.

Los resultados siguen una tendencia similar a la observada en el ensayo SR: con la paja se obtienen valores similares al blanco y la adición de lechuga o naranja empeora la calidad de esta propiedad cuando se incorporan altos porcentajes.

#### 4.4.4 Ensayo de tracción

Como resultado del ensayo de tracción se analizan los resultados de 3 parámetros para los grupos de muestras: el módulo de Young o módulo de elasticidad, el índice de resistencia a la tracción y el porcentaje de alargamiento. El módulo de Young es un parámetro que relaciona los incrementos de tensión aplicados en el ensayo y los incrementos de deformación longitudinal producidos en la probeta. El porcentaje de alargamiento es el tanto por ciento que se alarga la probeta sometida a tracción hasta el momento de su rotura y está relacionado con la elasticidad del material.

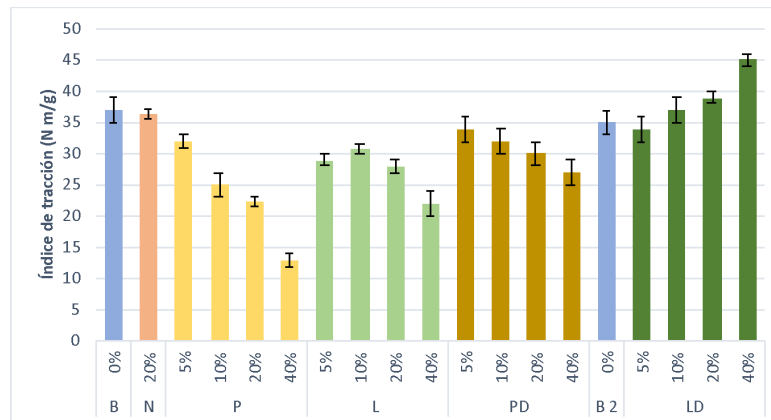
Los índices del módulo de Young varían de 416 MPa hasta 3360 MPa, siendo el valor del blanco de 2280 MPa. En la *Figura 22* se encuentra la representación gráfica de los resultados del módulo de Young para todos los grupos de muestras de papel.



*Figura 22: Caracterización de las formetas. Módulo de Young.*

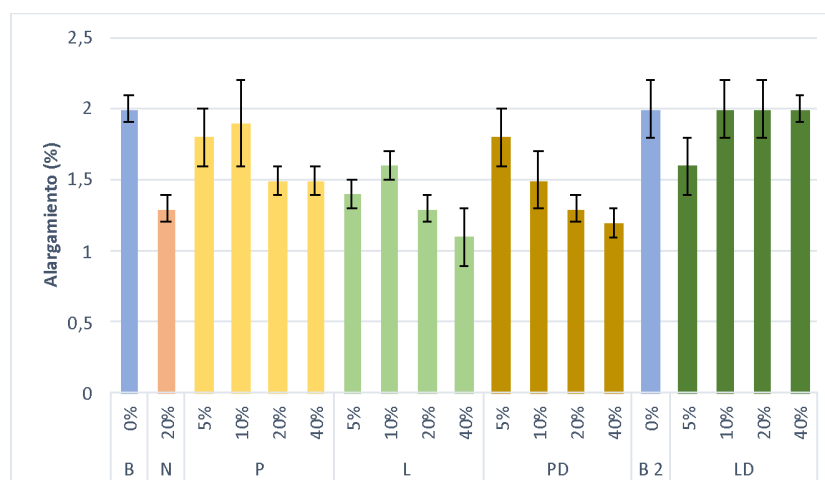
Por lo que se refiere a esta propiedad se observa que los mejores resultados corresponden a la paja deslignificada y a la lechuga deslignificada. Sin embargo, la paja deslignificada no permite adiciones en porcentajes muy grandes porque esta propiedad decrece en valor. La naranja no ofrece muy buenos resultados en este ensayo. Sorprende el bajo valor obtenido para la lechuga deslignificada al 5% que no se corresponde con la tendencia de los otros porcentajes.

En la *Figura 23* se muestra la gráfica de los resultados del índice de tracción. Los valores varían entre 13 y 45 Nm/g teniendo la formetas sin residuo un valor de 37 Nm/g y 35 Nm/g.



*Figura 23: Caracterización de las formetas. Índice de tracción.*

No se observan mejoras sustanciales en este parámetro con la adición de los residuos de paja y lechuga sin tratamiento. Los resultados obtenidos para la naranja y la paja deslignificada en pequeños porcentajes de adición, muestran que se mantienen las propiedades similares al blanco. Con la adición de lechuga deslignificada se observa un aumento proporcional en la medida llegando a aumentarse en un 12% y un 29% con el 20% y 40% de residuo deslignificado respectivamente.



*Figura 24: Caracterización de las formetas. Porcentaje de alargamiento.*

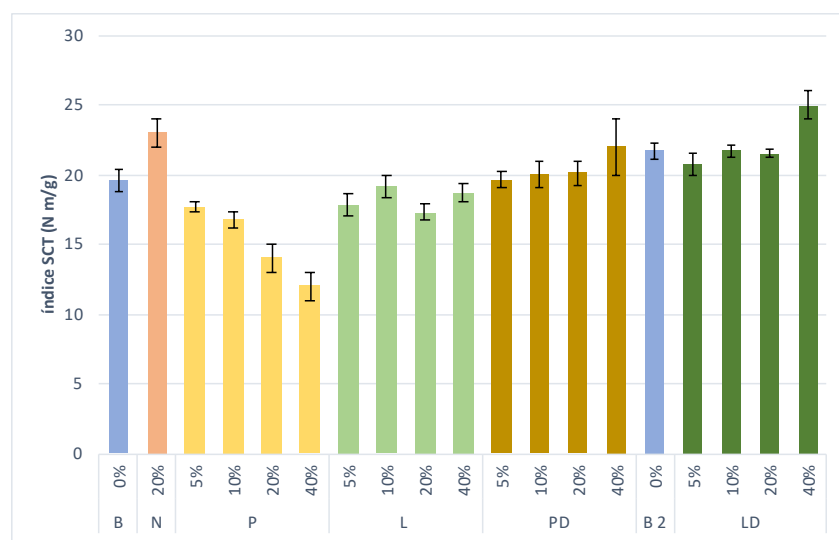
La *Figura 24* muestra el porcentaje de alargamiento para las muestras con un intervalo de confianza del 90%. Los valores varían entre 1,1% y el 2% siendo de 2% para los blancos. La introducción de residuos no genera ninguna mejora notable en las propiedades. Las propiedades que presenta el blanco se mantienen con la adición del 5% de paja o con los grupos de adición de lechuga deslignificada.

En el *Anexo II* se muestran los resultados obtenidos para otros parámetros que se obtienen a partir de este ensayo de tracción (carga de rotura, longitud de rotura e iTEA).

#### 4.4.5 Índice de compresión en corto (SCT)

Del ensayo de compresión en corto (SCT) se obtienen los valores del índice de compresión que aporta información acerca de la resistencia al apilamiento de las cajas de cartón, ya que esta es una de las principales aplicaciones de los papeles fabricados a partir de papel recuperado.

En la *Figura 25* se muestra la figura con los resultados para los diferentes grupos de residuos del índice de compresión en corto.



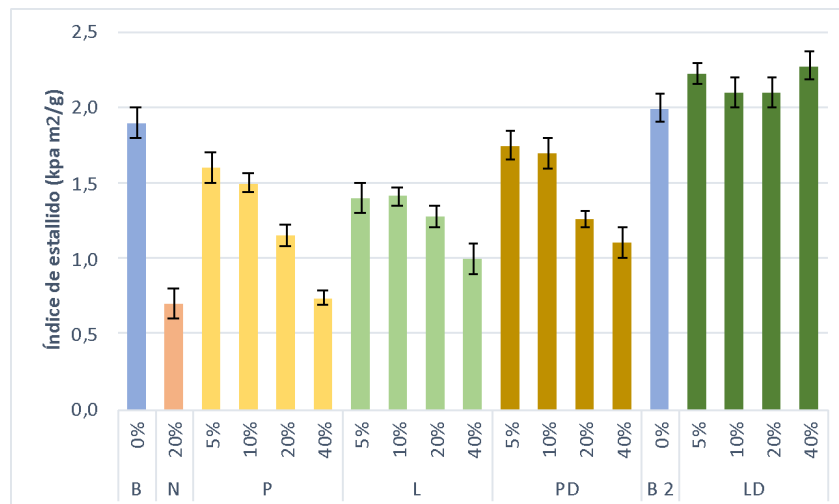
*Figura 25: Caracterización de las formetas. Índice SCT.*

Los valores de medida varían entre 12 Nm/g y 23 Nm/g, los blancos tienen índices SCT de 20 Nm/g y 21,7 Nm/g. Con la introducción de la naranja en el papel se observa un aumento en el índice del 15% lo que implica una mayor resistencia al apilamiento. Además, también se observa el aumento proporcional en el índice en el grupo de la paja deslignificada con el aumento de porcentaje de residuo, mientras que el comportamiento de la paja sin el proceso de eliminación de lignina es el contrario. También se observa un incremento en el índice respecto al blanco del 6% con la adición de lechuga deslignificada al 20 y 40%.

#### 4.4.6 Índice de resistencia al estallido

El índice de estallido aporta información sobre la vulnerabilidad del papel, sobre todo en las caras del cartón, ante un golpes frontales. Para menores valores del índice tendrá mayor vulnerabilidad.

Como puede verse en la *Figura 26* es uno de los parámetros que se ven más afectados por la adición de los residuos. Los valores obtenidos varían entre 0,74 y 2,20 kPa·m<sup>2</sup>/g, el blanco tiene un valor de 1,87 kPa·m<sup>2</sup>/g y la naranja al 20% en peso de 1,70 kPa·m<sup>2</sup>/g.



*Figura 26: Caracterización de las formetas. Índice de estallido.*

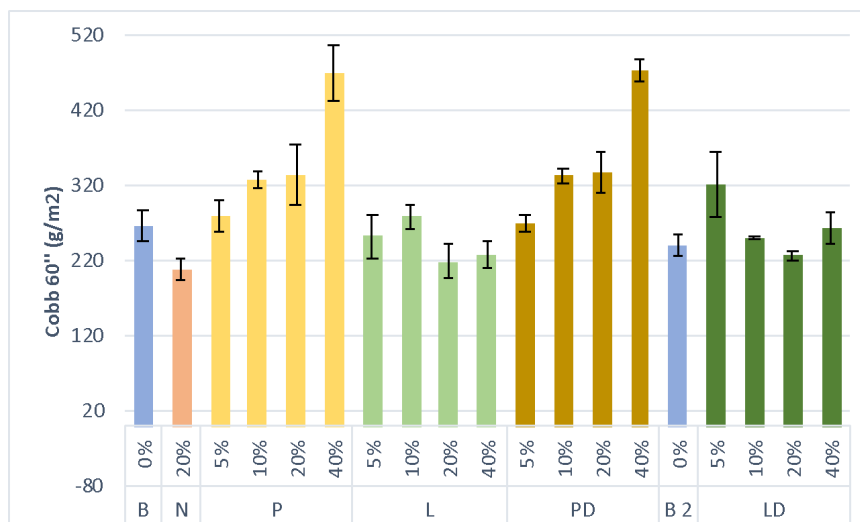
En los grupos que se obtienen mejores resultados son los correspondientes al residuo de lechuga deslignificada con valores del índice más que el blanco. Para la paja y la lechuga sin deslignificar en general se observa que, con el aumento en el porcentaje del residuo, disminuye el índice de. Se obtienen resultados positivos para la adición de porcentajes bajos de paja deslignificada y mejoras también con los grupos de lechuga deslignificada.

Este ensayo está relacionado con el de tracción ya que mide el comportamiento del papel sometido a una fuerza hasta su rotura, la tendencia en los resultados de los grupos es similar.

#### 4.4.7 COBB 60''

En el ensayo Cobb en 60 segundos se obtienen los resultados del ensayo relacionados con la capacidad de absorción de agua del papel. Son deseables valores bajos ya que implica mejor comportamiento en atmósferas húmedas, interesante en aplicaciones del papel como en cajas de cartón de productos alimenticios.

En la *Figura 27* se muestra la gráfica con la comparación de los resultados obtenidos para cada grupo. Los resultados varían entre 209 g/m<sup>2</sup> y 473 g/m<sup>2</sup>, con valores de 266 y 241,5 g/m<sup>2</sup> para los blancos.

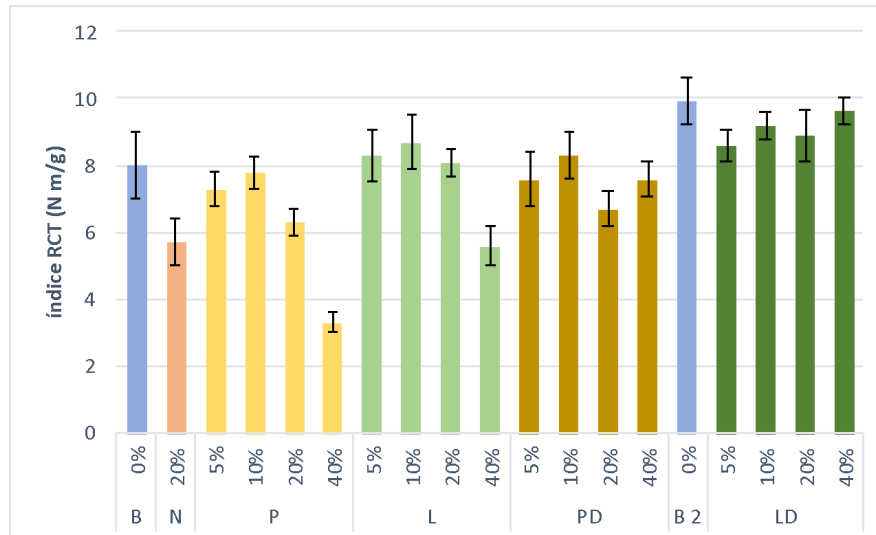


*Figura 27: Caracterización de las formetas. Cobb 60''.*

En este ensayo se obtienen buenos resultados para el grupo de papel con residuo de naranja cuyo índice se reduce en un 21% respecto al blanco. Con la lechuga deslignificada al 20% también se obtiene un valor del índice menor que el blanco correspondiente. En los resultados se observa que hay mucha diferencia entre la tendencia de comportamiento de los materiales con y sin lignina. Los materiales originales absorben una cantidad mayor de agua al aumentar su porcentaje, sin embargo, en los materiales deslignificados no hay una tendencia clara con la adición. Esto puede deberse a que en general la lignina es un material bastante hidrofílico (22) y el eliminarla de los residuos permite que el papel producido absorba una menor cantidad de agua.

#### 4.4.8 Índice de compresión RCT

El ensayo RCT está relacionado con la capacidad de resistencia de las cajas de cartón a la compresión lateral. En la *Figura 28* se muestra la gráfica con los resultados del índice RCT para los distintos grupos.



*Figura 28: Caracterización de las formetas. Índice RCT.*

Los valores del índice RCT varían entre 3 Nm/g y 10 Nm/g, con valores de 8 Nm/g y 9,9 Nm/g para ambos grupos de blancos respectivamente. No se observa ninguna mejora significativa de los grupos de residuos a excepción del grupo de lechuga sin tratamiento al 10% en composición, la cual experimenta un aumento del índice del 13%. Sin embargo, este grupo no presenta características de mejora en el resto de los parámetros estudiados.

En general se observa que el comportamiento de los materiales deslignificados es mejor que el de los materiales originales en los que el valor del ensayo disminuye al aumentar la cantidad de residuo añadido.



## 5. Diseño de proceso

De acuerdo con el estudio de la adición de los residuos agrícolas al papel y sus resultados, comentados anteriormente, se va a proponer un diagrama de bloques y un balance inicial de materia del proceso, para la producción de hojas de papel con la introducción de estos residuos, como forma de evaluar el posible aprovechamiento de los mismo.

Como ha podido verse en los resultados, los residuos de lechuga deslignificados producen el mantenimiento de las propiedades mecánicas e incluso la mejora de alguna de ellas como el índice de tracción, aunque incorporaciones altas de la lechuga producirían disminuciones en la productividad que posiblemente harían que su utilización no fuese económica. Por lo que se refiere a la paja, incorporaciones de porcentajes pequeños tampoco supondrían cambios sustanciales en las propiedades, manteniéndose en este caso el grado de desgote y la producción. A la vista del conjunto de resultados obtenidos se va a realizar un diseño básico del proceso para la incorporación del residuo de paja al 5% en composición y la lechuga deslignificada al 7%<sup>3</sup> con los que se obtienen resultados similares a los del papel recuperado, sin merma en la producción.

Para la realización de los balances se ha partido de la producción que se podría obtener en una máquina grande de papel para cartonaje. Esta se calcula sabiendo que el gramaje del papel será de 130 g/m<sup>2</sup>, que la máquina en la que se va a formar tiene una velocidad de trabajo de 50 km/h y un ancho de tabla de 7 m (ancho del papel fabricados), parámetros característicos de máquinas de fabricación de papel para cartón. La producción que se desea conseguir será de 45,5 ton/h de papel con un 9% de humedad.

El proceso descrito consta de dos líneas, la de la pasta de papel recuperado y la del residuo. El papel recuperado se somete a una depuración para disminuir la cantidad inicial de impurezas que contiene (del 5% a 0,1%) y que las mismas no interfieran en la calidad final del papel obtenido. El papel se introduce en el pulper donde se forma la pasta de papel con la adición de agua. A continuación, la pasta se somete a diferentes etapas de limpieza, refinado, destintado, dispersión y regulación de la consistencia (contenido en sólidos), para conseguir una pasta final con un porcentaje de sólido del 0,75%, con el que se alimenta a la máquina de papel. La línea del residuo se basa en someterlo al tratamiento previo necesario y su dilución para conseguir el mismo porcentaje de materia sólida que en la pasta de papel. Ambos se juntan previamente a

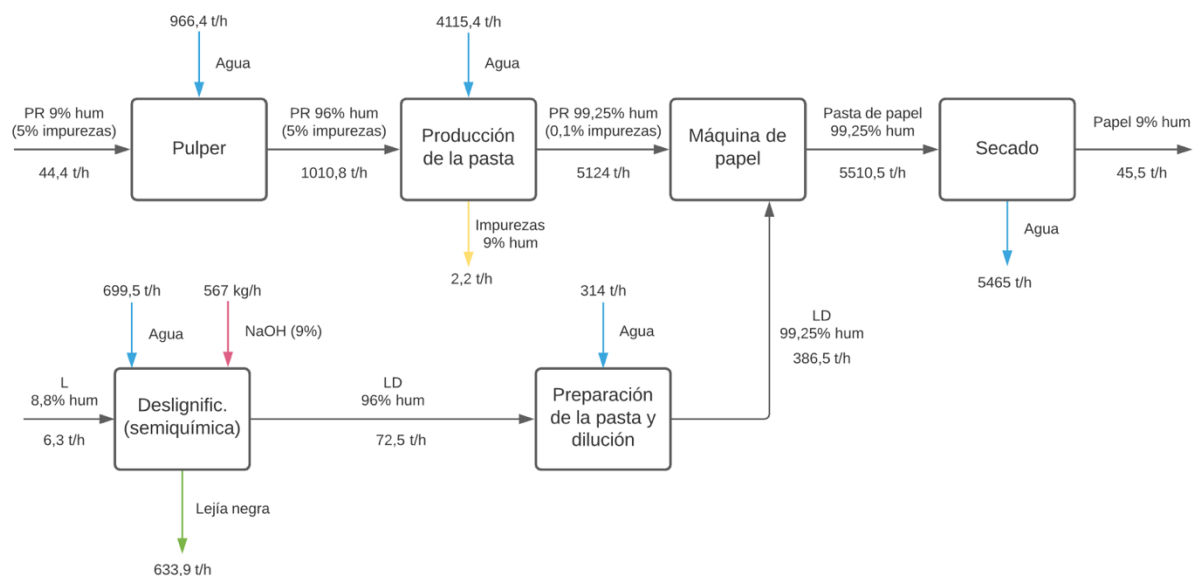
---

<sup>3</sup> Se elige este porcentaje ya que en el estudio se han obtenido buenos resultados para el 5% y 10%, siendo el 7% una composición intermedia entre ellos.

la máquina de papel donde se produce la retirada del agua de la pasta por métodos mecánicos y térmicos, adecuándose su humedad a la deseada para el producto final.

Los flujos máscicos de cada corriente se han calculado mediante balances de materia y teniendo en cuenta las humedades de las distintas materias, así como la introducción de agua necesaria o los residuos producidos.

En la *Figura 29* se muestra el diagrama de bloques del proceso empleando como materias primas la lechuga deslignificada (LD) en 7% en peso y papel recuperado (PR). Se parte de la lechuga (L), la cual se somete al proceso semiquímico de deslignificación para obtener LD. Además, están indicados los flujos de entrada y salida de agua, impurezas y reactivos, así como los flujos máscicos de cada corriente y sus humedades.



*Figura 29: Diagrama del proceso para la lechuga deslignificada al 7% en peso.*

En la *Figura 30* se encuentra el diagrama correspondiente al proceso de fabricación de papel con la introducción de paja (P) al 5% en peso. Este residuo no estaría sometido al proceso de deslignificación, solo se somete a una dilución con agua.

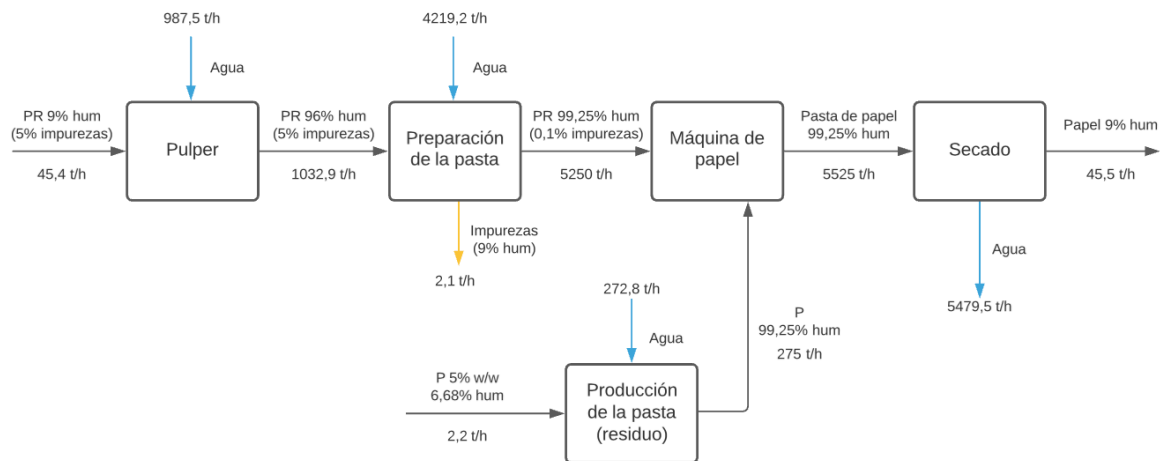


Figura 30: Diagrama del proceso para la paja al 5% en peso.

Finalmente se observa que se podría obtener un aprovechamiento de los residuos industriales de aproximadamente 23000 t/año<sup>4</sup> para el residuo de lechuga deslignificada, en consecuencia, de 50000 t/año para la lechuga, y de 17500 t/año para la paja sin tratamiento con la introducción de estos para la fabricación de papel para cartón a partir de papel recuperado.

<sup>4</sup> Usando como referencia 330 días laborales en la industria y que se trabaja 24h al día.

## 6. Conclusiones

En este Trabajo Fin de Grado se ha realizado el estudio de la introducción de distintos residuos agrícolas a la pasta proveniente de fibras secundarias para la producción de papel para embalaje y se han comparado los resultados obtenidos con los del papel sin introducción de los residuos. Los residuos empleados son paja y lechuga, sometidos también a procesos de deslignificación, y naranja. Las principales conclusiones obtenidas en el trabajo son:

- El residuo de naranja, en el porcentaje de composición empleado, no proporciona una mejora en las propiedades de la hoja de papel, en general, y además produce una pérdida de la porosidad y desgote del papel.
- El residuo de paja, incorporado en pequeños porcentajes como del 5% al papel, no supone pérdidas sustanciales en las propiedades e incluso supone una mejora en la porosidad y el desgote.
- La adición del residuo de lechuga deslignificada ayuda a mantener o incluso mejorar las propiedades de la hoja de papel, pero a costa de pérdidas de porosidad o de producción importantes si se utilizan porcentajes altos de incorporación.
- La deslignificación de los residuos, en comparación con la utilización de los materiales tal y como se recibieron produce un efecto apreciable en la mejora de algunas propiedades como el índice de estallido, índice RCT y en el ensayo de tracción. Esto es especialmente notable en el caso de la lechuga.

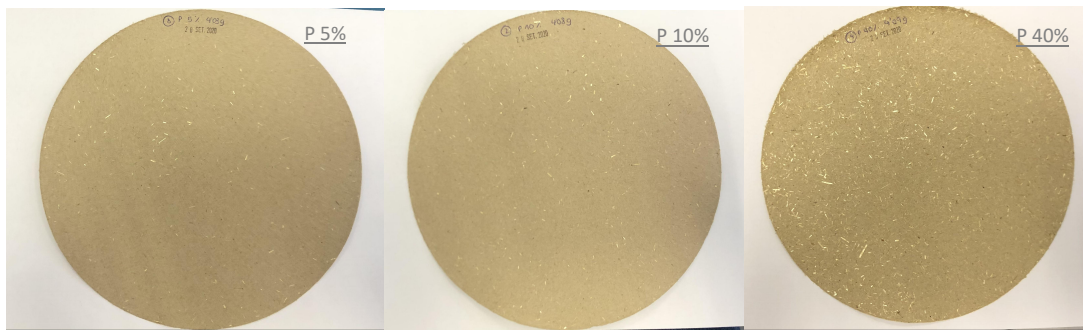
Como conclusión, se ha observado que se podría introducir tanto paja sin tratar como lechuga deslignificada en pequeños porcentajes a la pasta de papel como forma de aprovechamiento industrial de los residuos agrícolas consiguiendo que se mantengan las propiedades del papel e incluso con alguna mejora en estas. Esto no produciría efectos importantes sobre la porosidad del papel y el desgote de la pasta. La adición de porcentajes mayores de residuo no parece asumible puesto que tienen grandes efectos y desmejoras en la calidad final de la hoja de papel.

## 7. Bibliografía

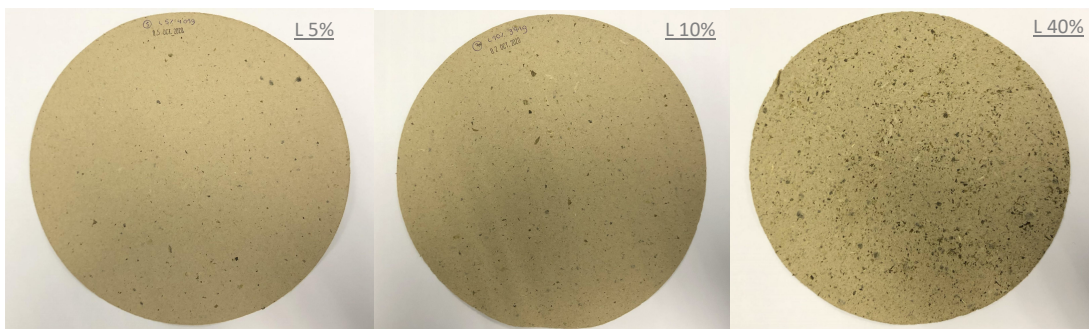
1. ASPAPEL. La producción de papel crece el 4,5% en 2019 y el 1,1% en el primer cuatrimestre del 2020. [Internet]. [cited 2020 Jul 31]. Available from: <http://www.aspapel.es/content/la-produccion-de-papel-crece-el-45-en-2019-y-el-11-en-el-primer-cuatrimetre-de-2020>
2. ASPAPEL. Agenda Sectorial Industria Papelera [Internet]. 2018 [cited 2020 Aug 8]. Available from: [http://www.aspapel.es/sites/default/files/publicaciones/doc\\_513\\_agenda\\_sectorial\\_industria\\_papelera\\_0.pdf](http://www.aspapel.es/sites/default/files/publicaciones/doc_513_agenda_sectorial_industria_papelera_0.pdf)
3. Iosip A, Nicu R, Ciolacu F, Bobu E. Influence of recovered paper quality on recycled pulp properties. *Cellul Chem Technol.* 2010;44(10):513–9.
4. Brancato AA. Effect of Progressive Recycling on Cellulose Fiber Surface Properties. Tesis doctoral. Institute of Paper Science and Technology. Georgia Institute of Technology; 2008.
5. Fahmy Y, Fahmy T, Mobarak F, El-Sakhawy M, Fadl M. Agricultural Residues (Wastes) for Manufacture of Paper, Board, and Miscellaneous Products: Background Overview and Future Prospects. *Int J ChemTech Res.* 2017;10(2):424–48.
6. Marín F. Producción de pasta de papel semiquímica a partir de Miscanthus. Estudio Técnico y Económico. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza; 2013.
7. González P. Materiales celulósicos nanoestructurados obtenidos a partir de papel recuperado. Caracterización e incorporación a papel reciclado como agentes de refuerzo. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza; 2013.
8. ASPAPEL. Papeles producidos con papel recuperado, recuperación y clasificación del papel. 2020;
9. Ekhuemelo DO. Potentials of agricultural waste and grasses in pulp and papermaking. *J Res For Wildl Environ.* 2012;4(2):79-91–91.
10. Sappi. The Paper Making Process. From wood to coated paper [Internet]. 2003 [cited 2020 Jul 31]. Available from: [https://www.sappiandyou.sappi.com/wp-content/uploads/2019/02/2018\\_a4\\_technical-brochure-paper\\_making\\_process\\_en.pdf](https://www.sappiandyou.sappi.com/wp-content/uploads/2019/02/2018_a4_technical-brochure-paper_making_process_en.pdf)
11. Jiménez Muñoz E, Prieto García F, Prieto Mendez J, Acevedo Sandoval OA, Rodríguez Laguna R. Obtaining pulp from waste of Agave salmiana B. *Dyna* [Internet]. 2017;84(200):253–60. Available from: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v84n200.58906>
12. Chávez Sifontes M, Domine ME. Lignin, Structure and Applications: Depolymerization Methods for Obtaining Aromatic Derivatives of Industrial Interest / Lignina, Estructura Y Aplicaciones: Métodos De Despolimerización Para La Obtención De Derivados Aromáticos De Interés Industrial. *Av en Ciencias e Ing* ISSN-e 0718-8706, Vol 4, N° 4, 2013, págs 15-46. 2010;4(4):15–46.
13. Gonzalo A, Bimbela F, Sánchez JL, Labidi J, Marín F, Arauzo J. Evaluation of different agricultural residues as raw materials for pulp and paper production using a

- semichemical process. *J Clean Prod.* 2017;156:184–93.
14. Area MC, Mastrantonio G, Velez H. Gestión ambiental en la fabricación de papel reciclado. *Reciclado celulósico.* 2012;(June):306.
  15. Campano C. Alternativas para facilitar el uso de nanocelulosas en la producción de papel reciclado. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid; 2019.
  16. Chang JC, Beach RH, Olivetti EA. Consequential effects of increased use of recycled fiber in the United States pulp and paper industry. *J Clean Prod* [Internet]. 2019;241:118133. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619330033>
  17. Ellis R, Sedlachek K. Recycled vs. virgin fiber characteristics: a comparison. *Tappi J.* 1993;76(2):143–6.
  18. Jonoobi M, Oladi R, Davoudpour Y, Oksman K, Dufresne A, Hamzeh Y, et al. Different preparation methods and properties of nanostructured cellulose from various natural resources and residues: a review. *Cellulose.* 2015;22(2):935–69.
  19. Hern D, Sevilla T. Efecto del refinado en las propiedades de pastas celulósicas de paja de trigo “a la sosa” blanqueadas mediante métodos TCF. Tesis doctoral. Universidad Pablo de Olavide de Sevilla; 2015.
  20. Al-Kaabi Z, Pradhan RR, Thevathasan N, Chiang YW, Gordon A, Dutta A. Potential value added applications of black liquor generated at paper manufacturing industry using recycled fibers. *J Clean Prod* [Internet]. 2017;149:156–63. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617302883>
  21. Naciones Unidas. Objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas [Internet]. [cited 2020 Nov 1]. Available from: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
  22. Liu Z, Xu D, Xu L, Kong F, Wang S, Yang G. Preparation and characterization of softwood kraft lignin copolymers as a paper strength additive. *Polymers (Basel).* 2018;10(7).

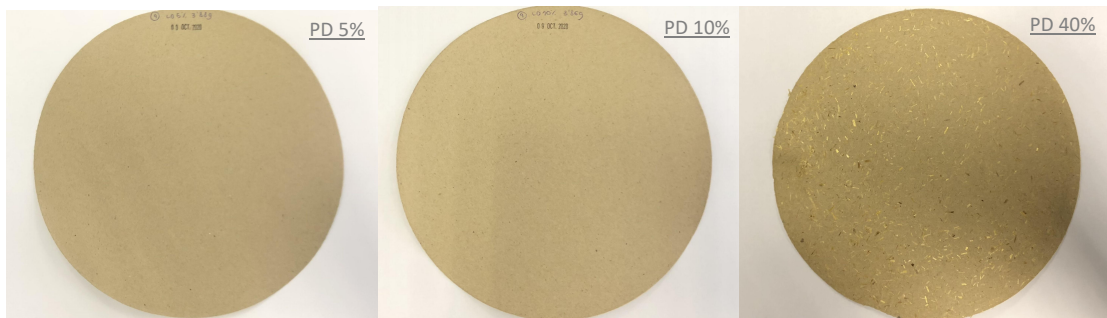
**ANEXO I: Imágenes de las formetas elaboradas.**



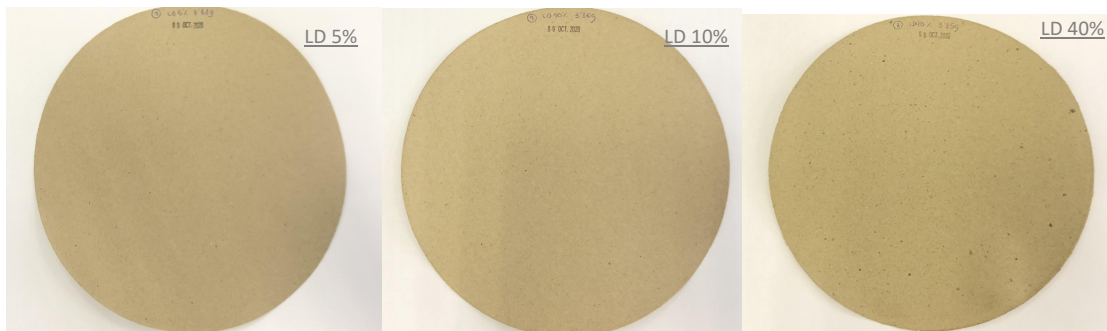
*Figura 31: Formetas de paja al 5, 10 y 40%.*



*Figura 32: Formetas de lechuga al 5, 10 y 40%.*



*Figura 33: Formetas de paja deslignificada al 5, 10 y 40%.*



*Figura 34: Formetas de lechuga deslignificada al 5, 10 y 40%.*

En este apartado se encuentran las imágenes de las formetas correspondientes a los distintos grupos: blanco, paja, lechuga, naranja, paja deslignificada y lechuga deslignificada, en los porcentajes en peso de sus residuos respectivos al 5, 10 y 40%. Las imágenes y su aspecto visual se muestran en las *Figuras 31, 32, 33 y 34*. La conclusión acerca del aspecto visual de las hojas de papel elaboradas y las imágenes de los grupos de formetas con el 20% en peso de residuo y los blancos se encuentran en el apartado 4.4.1 Aspecto visual.



**ANEXO II: Otros resultados del ensayo de resistencia a la tracción.**

En la *Tabla 8* se muestran los resultados adicionales obtenidos en el ensayo de tracción de carga de rotura, longitud de rotura e índice TEA. La carga de rotura o resistencia a la tracción es la carga máxima resistida por la probeta dividida por su sección inicial. Por su parte, el iTEA se corresponde con índice de energía absorbida durante la tracción e indica el trabajo que se necesita para romper la probeta de muestra.

*Tabla 8: Otros parámetros obtenidos en el ensayo de tracción.*

	<i>Carga de rotura (kN/m)</i>	<i>Longitud de rotura (km)</i>	<i>iTEA (J/m<sup>2</sup>)</i>
<i>B</i>	4,9 ± 0,2	3,7 ± 0,2	66 ± 8
<i>N 20%</i>	4,8 ± 0,2	3,70 ± 0,09	32 ± 5
<i>P 5%</i>	4,4 ± 0,2	3,3 ± 0,1	57 ± 8
<i>P 10%</i>	3,6 ± 0,3	2,6 ± 0,2	46 ± 6
<i>P 20%</i>	3,1 ± 0,1	2,28 ± 0,08	33 ± 4
<i>P 40%</i>	1,7 ± 0,2	1,3 ± 0,1	14 ± 3
<i>L 5%</i>	4,0 ± 0,1	2,9 ± 0,1	38 ± 5
<i>L 10%</i>	4,2 ± 0,1	3,14 ± 0,09	46 ± 5
<i>L 20%</i>	3,9 ± 0,2	2,8 ± 0,1	32 ± 5
<i>L 40%</i>	2,8 ± 0,3	2,3 ± 0,3	20 ± 6
<i>PD 5%</i>	4,7 ± 0,3	3,5 ± 0,2	59 ± 9
<i>PD 10%</i>	4,4 ± 0,3	3,3 ± 0,2	46 ± 8
<i>PD 20%</i>	4,3 ± 0,2	3,1 ± 0,2	38 ± 6
<i>PD 40%</i>	3,7 ± 0,3	2,8 ± 0,2	27 ± 4
<i>B 2</i>	4,6 ± 0,3	3,6 ± 0,2	64 ± 13
<i>LD 5%</i>	4,7 ± 0,2	3,5 ± 0,2	50 ± 10
<i>LD 10%</i>	5,0 ± 0,3	3,8 ± 0,2	71 ± 12
<i>LD 20%</i>	5,3 ± 0,2	3,9 ± 0,1	74 ± 12
<i>LD 40%</i>	6,0 ± 0,1	4,6 ± 0,1	84 ± 8