



## Revalorización energética de la lignina procedente de residuos agrícolas utilizados para la obtención de pastas celulósicas

**Autor:** María Jesús De la Torre

**Institución:** Universidad Pablo de Olavide

**Otros autores:** María Dolores Hernández de la Torre, Antonio Tijero Cruz, María López Alonso, María José Fernández Rodríguez, Ana Moral Rama

## Resumen

La disminución de las reservas de petróleo junto con el aumento de las emisiones de los gases de efecto invernadero ha dado lugar a un creciente interés en la producción y utilización de combustibles alternativos a los actuales combustibles fósiles. Para producir bioetanol a escala industrial se emplea biomasa amilácea o azucarada como materia prima lo que ha derivado en un intenso debate sobre su sostenibilidad. En este contexto, el bioetanol producido a partir de biomasa lignocelulósica se muestra como una alternativa interesante ya que estas materias primas se encuentran ampliamente distribuidas, no compiten con el mercado alimentario y son más baratas que los recursos agrícolas convencionales. En la actualidad, la principal fuente de lignina aislada son los procesos de fabricación de pasta y papel. La obtención de pastas de celulosa por el proceso Organosolv es una de las alternativas más interesantes debido que la lignina Organosolv presenta índices de fluidez elevados y puede alimentarse fácilmente en la cámara de combustión de hornos y calderas. El contenido en cenizas de las ligninas Organosolv es pequeño, frente a otras ligninas industriales, como las ligninas Kraft, lo que hace su combustión sea más sencilla. El objetivo de este trabajo es deslignificar materiales lignocelulósicos procedentes paja de trigo mediante procesos Organosolv y cuantificar la lignina residual que queda disuelta en las lejías negras para su aprovechamiento energético. Para la deslignificación de la paja de trigo se han empleado mezclas etanol-agua y mezclas acetona-agua, ambos catalizados con diversos ácidos, que permite un fácil reciclaje de disolventes, así como la recuperación de la lignina disuelta.

**Palabras claves:** Residuos, lignina, energía, biocombustible

## INTRODUCCIÓN

La demanda global de energía continua creciendo impulsada por el aumento de la población y el incremento de la producción industrial en los países en vías de desarrollo. En la actualidad esta demanda se cubre por combustibles fósiles que van asociados a problemas tales como el cambio climático, la seguridad en el suministro así como contaminación medioambiental (1-3). La quema de combustibles fósiles para la generación de calor o energía representa la mayor fuente de emisiones de carbono antropogénicas, siendo los combustibles líquidos los responsables del 30% de las emisiones en los países industrializados (4). Por ello, la sustitución de dichos combustibles por fuentes renovables se ha convertido en un claro objetivo político, tanto en economías desarrolladas como en vías de desarrollo.

Los biocombustibles para el transporte tienen generalmente un balance energético positivo, ya que la cantidad de energía contenida en el producto es superior a la requerida para su producción y distribución (5). Los biocombustibles emiten, en principio, menos CO<sub>2</sub> porque están producidos por un ciclo del carbono a corto plazo y su combustión sólo devuelve a la atmósfera el CO<sub>2</sub> que la planta ha fijado para su crecimiento. Estudios del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) consideran una reducción de las emisiones de entre el 30% y el 50% con respecto a los combustibles fósiles para los biocarburantes producidos con las tecnologías convencionales a partir de grano de cereal y aceites vegetales. No obstante, se prevén reducciones del 80-90% en el caso de los biocarburantes producidos a partir de biomasa lignocelulósica (6).

El cultivo azucarado más ampliamente empleado para la producción de bioetanol es la caña de azúcar, ya sea en forma de melaza o de zumo de caña (7, 8). En cuanto al bioetanol producido de cultivos amiláceos, la mayor parte proviene del maíz (9,10) y en menores cantidades del trigo (11) pero también de la tapioca (12), centeno (13) cebada (14) o sorgo (15,16). El bioetanol producido actualmente a nivel industrial a partir de las mencionadas materias primas forma parte de los denominados combustibles de primera generación.

El principal problema derivado de la producción de bioetanol a partir de este tipo de biomasa es el elevado coste de la materia prima, ya que dichas biomásas azucaradas y amiláceas están ligadas al mercado alimentario, lo que repercute en el precio final del producto. Además del dilema moral que puede suponer la utilización de productos alimentarios con fines energéticos. Para lograr un precio competitivo del bioetanol se deben reducir los precios de las materias primas, ya que éstas pueden llegar a suponer un 60-70% del coste final del etanol (17). En ese contexto, aparecen los denominados biocombustibles de segunda generación, producidos a partir de biomasa lignocelulósica, barata y abundante, y cuya producción mundial potencial se ha calculado en 16 veces más alta que la actual producción a partir de almidón o azúcares (18).

En la actualidad, la principal fuente de lignina aislada, esto es, separada de otros constituyentes de la materia vegetal, son los procesos de fabricación de pasta y papel (19-21). La proporción y forma en que queda la lignina tras el proceso de fabricación de papel a partir de madera, depende en gran medida del proceso empleado. La lignina que se obtiene en las fábricas que emplean el proceso Kraft, el más extendido de los

procesos de obtención de pasta química, por cocción con lejías de sosa y sulfuro sódico, conocida como lignina Kraft, tiene el inconveniente de su contenido en compuestos de azufre, entre los que se encuentran los lignosulfonatos (22,23).

Frente a las indudables ventajas del proceso Kraft, en cuanto a calidad y resistencia de sus pastas, presenta ciertas desventajas como el bajo rendimiento, el gran consumo de reactivos de blanqueo en la obtención de pasta blanqueada y la emisión de compuestos gaseosos de azufre tanto en la cocción como en la recuperación de los compuestos minerales de las lejías, de las cenizas que quedan tras su combustión (24,25).

Así pues, la vía de aprovechamiento energético de la lignina Kraft, es, generalmente, por su concentración evaporación y su combustión en caldera, para recuperar su calor de combustión y recuperar, también, los reactivos minerales por lixiviación de las cenizas.

Varios autores han estudiado la eficacia de los procesos de pasteado con diferentes disolventes orgánicos como alcoholes, cetonas, glicoles y otros, en términos de rendimiento del proceso, calidad de las pastas y condiciones óptimas de operación (26-27). En la obtención de pastas de celulosa por el proceso Organosolv, se usan disolventes orgánicos como agentes de deslignificación, siendo una de las alternativas más interesantes a las tecnologías industriales actuales debido que se obtiene la pasta de celulosa y una disolución, que, por mantener los términos tradicionales, llamaremos lejías, que contienen productos de degradación de la hemicelulosa y la lignina disuelta, libres de azufre (28). Por haberse obtenido en un proceso menos agresivo, las ligninas Orgasolv presentan diferencias significativas respecto a otras ligninas obtenidas por los métodos químicos convencionales. Estructuralmente, las ligninas Orgasolv tienen una mayor cantidad relativa de grupos hidroxilo fenólicos, **y cetónicos**, que dan una estructura más oxidada (Hibbert cetonas). La temperatura de transición vítrea (Tg) de las ligninas Organosolv, son más bajas, por lo son más fáciles de procesar térmicamente que las ligninas kraft. Estas diferencias hacen interesante la utilización de lignina Orgasolv como combustible térmico ya que presenta índices de fluidez más altos a igual temperatura y pueden alimentarse más fácilmente en la cámara de combustión de hornos y calderas.

El contenido en cenizas de las ligninas Orgasolv es pequeño, frente a otras ligninas industriales, como las ligninas Kraft debido al proceso químico utilizado, lo que hace su combustión sea más sencilla (29).

El contenido en lignina, difiere entre los diferentes materiales lignocelulósicos (tabla 1). La estructura química de la lignina de las maderas ha sido ampliamente estudiada, sin embargo en el caso de los materiales herbáceos como la paja, su estructura y las interacciones entre los demás componentes de la pared celular no son todavía bien conocidas. En la figura 1 se muestra una aproximación de la estructura de la lignina para la paja de trigo.

Tabla 1. Composición de diferentes materiales lignocelulósicos encontrados en la bibliografía.

Biomasa	Glucano	Xilano	Manano	Galactano	Arabinano	Lignina	Referencia
<b>Maderas duras</b>							
Chopo	43,5	15,5	2,5	2,3	1,5	26,2	Negro y col., 2003
Arce	44,9	17,3	2,9	n.d.	2,8	28,0	Wyman, 1996
Nogal	46,2	16,5	2,6	n.d.	1,8	21,9	Wyman, 1996
Sauce	41,5	15,0	3,0	2,1	1,8	25,2	Sassner y col., 2006
Abedul	38,2	18,5	1,2	n.d.	n.d.	22,8	Hayn y col., 1993
Álamo	49,9	17,4	4,7	2,3	1,8	18,1	Wyman, 1996
<b>Maderas blandas</b>							
Pino	46,4	7,8	10,6	n.d.	2,2	29,4	Wyman, 1996
Abeto	49,9	5,3	12,3	2,3	1,7	28,7	Doderstron y col., 2003
<b>Otras</b>							
Ramón de olivo	25,0	9,8	0,7	1,4	2,1	18,8	Cara y col., 2007
Residuos de maíz	36,8	22,2	n.d.	2,9	5,5	23,1	Öhgren y col., 2005
Paja de trigo	30,2	18,7	n.d.	0,8	2,8	17,0	Ballesteros y col., 2006
Paja de cebada	33,1	20,2	n.d.	0,9	3,8	16,1	García-Aparicio y col., 2006

n.d. no detectado

La paja de trigo ocupa el primer lugar como fuente de biomasa en Europa y el segundo a escala mundial, después de la paja de arroz (34). La paja de trigo tiene algunas obvias diferencias en estructura y composición química. Su lignina, tiene un peso molecular más bajo, un grado mayor de dispersión y más enlaces inestables que la de la madera; los grados de polimerización de su celulosa y de su hemicelulosa son más bajos. Por estas características, la paja de trigo tiene una energía de actividad de lignificación más baja (30).

En este trabajo se pretende un doble objetivo, por un lado deslignificar materiales lignocelulósicos procedentes de residuos agrícolas, en concreto paja de trigo, mediante procesos limpios como son los procesos Organosolv y por otro lado cuantificar la lignina residual que queda disuelta en las lejías negras para su aprovechamiento energético. Para la deslignificación de la paja de trigo se han utilizado procesos de pasteado Organosolv empleando mezclas etanol-agua y mezclas acetona-agua, ambos catalizados con diversos ácidos, que permite un fácil reciclaje de disolventes, así como la recuperación de los subproductos generados, entre ellos la lignina disuelta, en las lejías negras del pasteado.

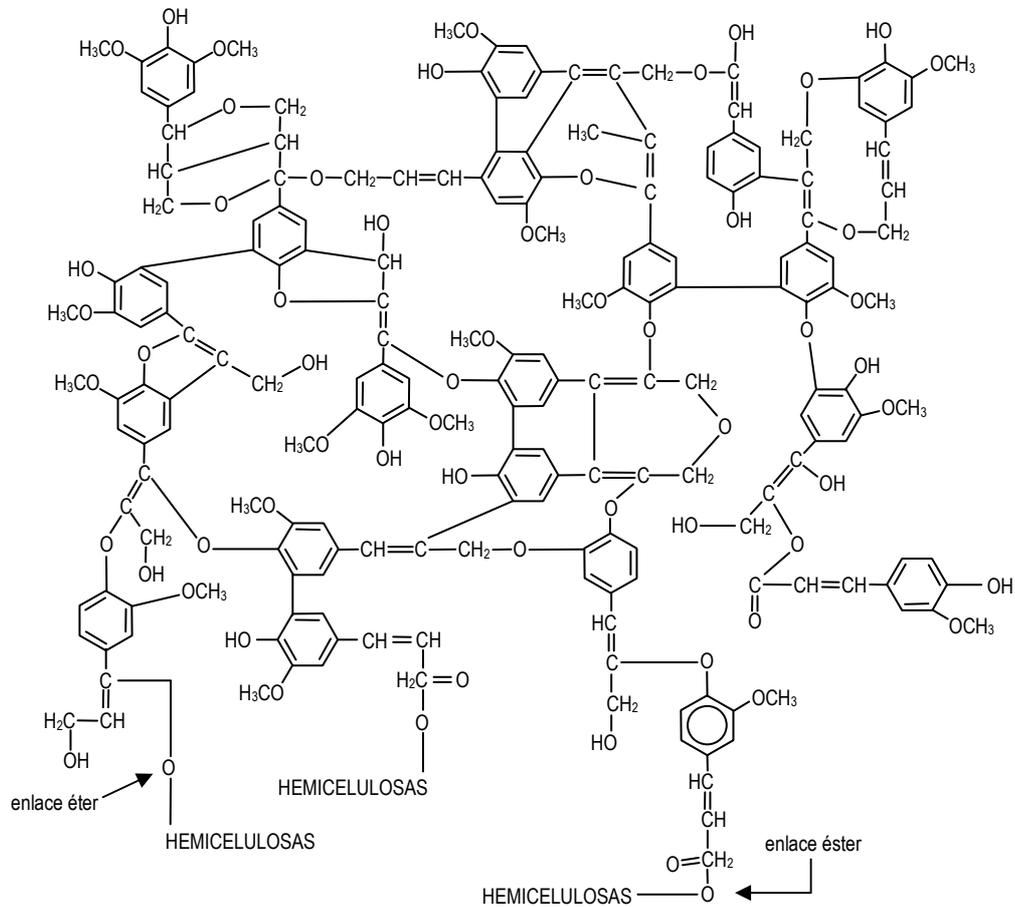


Figura 1. Estructura aproximada de la lignina de la paja de trigo

## PARTE EXPERIMENTAL

### Materia prima

Se utiliza paja de trigo con la siguiente composición: 4,01% de contenidos de extraíbles en etanol-benceno, 76,20% de holocelulosa, 39,72% de alfa-celulosa y 17,28% de lignina (porcentaje sobre materia seca). Las desviaciones típicas de las tres determinaciones realizadas para cada ensayo son, en todos los casos, menores del 10% respecto a los valores medios.

### Caracterización de la materia prima y de las pastas celulósicas

La paja de trigo se caracteriza determinando los contenidos de holocelulosa mediante el método Wise et al., y los de alfacelulosa, lignina, cenizas y extraíbles en etanol-benceno de acuerdo con las normas TAPPI T-203-0S-61, T-222, T-221, T-204, T-257 y TT 212, respectivamente (31).

Para la caracterización de las pastas se siguen los mismos métodos que para la paja de trigo y el rendimiento se determina gravimétricamente.

### Pasteado

Se introduce la paja de trigo junto con el licor de cocción en un reactor Berghof de 750 ml y se calienta a la temperatura de funcionamiento, que se mantiene durante todo el experimento. Después de la cocción, la pasta se desintegra en un mezclador de laboratorio y se lava con agua destilada.

### Diseño de experimentos

El modelo ensayado experimenta con una serie de puntos (experimentos) alrededor de un punto de composición central (experimento central), y con puntos adicionales (experimentos adicionales), para la estimación de los términos de una ecuación polinómica de segundo orden:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot X_{ni} + \sum_{i=1}^k c_i \cdot X_{ni}^2 + \sum_{i=1}^k d_{ij} \cdot X_{ni} \cdot X_{nj} \quad (i < j) \quad [1]$$

donde Y es la respuesta o variable dependiente (rendimiento de las pastas y cantidad extraída de lignina);  $X_n$  es el valor normalizado de la correspondiente variable independiente (temperatura, tiempo, concentración de disolvente y concentración de catalizador); y  $a_0$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  y  $d_{ij}$  son constantes características desconocidas, calculadas a partir de los datos experimentales.

Este diseño cumple con el requisito general de que todos los parámetros en el modelo matemático se pueden estimar con un número bastante reducido de experimentos (32), que para cuatro variables como es nuestro caso necesita 25 experimentos diferentes. Los valores de las variables independientes se normalizan entre -1 y 1, utilizando la expresión:

$$X_n = 2 \cdot \frac{X - \bar{X}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad [2]$$

Siendo  $X$ ,  $\bar{X}$ ,  $X_{\max}$  y  $X_{\min}$ , el valor absoluto, el valor medio, el valor máximo y el valor mínimo de la variable independiente, respectivamente.

## RESULTADOS Y DISCUSION

Aunque la bibliografía señala que la paja de trigo ha sido pasteada con disolventes orgánicos, no se tiene información acerca de que se haya estudiado el pasteado organosolv de la paja de trigo empleando catalizadores de una manera rigurosa, utilizando un diseño factorial de experimentos.

Basándonos en algunos de estos resultados se eligió como disolventes orgánicos para el pasteado de la paja de trigo, el etanol y la acetona, ya que proporcionan pastas con mayores rendimientos y mejores propiedades.

Antes de proceder al estudio del pasteado con estos disolventes orgánicos utilizando catalizador, se lleva a cabo un estudio comparativo de las características de pastas obtenidas con etanol y diversos catalizadores.

Operando a la temperatura de 150°C durante 30 minutos con concentraciones de etanol y de catalizador de 50% y 0,001 N, respectivamente y un hidromódulo de 40 se obtienen pastas cuya caracterización proporciona los resultados de la tabla 2.

Como se observa en la tabla 2, al utilizar ácidos minerales se consiguen mayores grados de deslignificación de la pastas (menores rendimientos en pastas y mayores cantidades extraídas de lignina), lo que indica que estos catalizadores son más eficaces, destacando entre ellos el ácido clorhídrico, por lo que se ha elegido éste para el estudio de los pasteados con etanol y acetona siguiendo un diseño factorial de experimentos de composición central.

Tabla 2. Resultados experimentales obtenidos en el pasteado con etanol y diversos catalizadores.

Catalizador	R <sub>e</sub> (%)	L <sub>e</sub> (%)
Ácido clorhídrico	55,04	61,17
Ácido sulfúrico	56,07	60,64
Ácido nítrico	56,00	58,71
Ácido fosfórico	56,53	58,78
Ácido fórmico	64,53	49,55
Ácido acético	62,93	50,84
Ácido oxálico	63,47	48,03
Cloruro cálcico	63,64	51,20
Cloruro alumínico	59,07	51,60
Cloruro férrico	63,33	49,42

R<sub>e</sub>, rendimiento en el proceso con etanol y catalizador (porcentaje respecto a materia prima seca); L<sub>e</sub>, cantidad extraída de lignina en el proceso con etanol y catalizador (porcentaje respecto a la cantidad de lignina inicial)

La tabla 3 muestra los valores de las variables independientes utilizadas en los diferentes experimentos. La temperatura varía entre 150 y 190°C, el tiempo entre 30 y 120 minutos, la concentración de disolvente orgánico entre 50 y 80% y la concentración de catalizador entre 0,001 y 0,01 N. En todos los experimentos se utilizó un hidromódulo de 4. Los valores de X<sub>n</sub> obtenidos varían de -1 a 1.

Tabla 3. Condiciones de operación utilizadas y resultados experimentales obtenidos en el pasteado con etanol y ácido clorhídrico y en el pasteado con acetona y ácido clorhídrico.

Variables de operación				Resultados experimentales			
$X_T$	$X_t$	$X_D$	$X_C$	$R_e$ (%)	$L_e$ (%)	$R_a$ (%)	$L_a$ (%)
0	0	0	0	37,30	85,17	44,70	80,70
+1	+1	+1	+1	16,93	89,21	21,04	89,92
+1	+1	+1	-1	40,33	84,50	51,53	73,76
+1	+1	-1	+1	16,80	89,95	33,11	80,17
+1	+1	-1	-1	31,13	88,56	37,87	83,65
+1	-1	+1	+1	20,93	91,24	19,40	87,99
+1	-1	+1	-1	34,07	88,41	44,13	77,22
+1	-1	-1	+1	14,64	94,02	23,93	87,38
+1	-1	-1	-1	31,80	88,00	32,13	83,38
-1	+1	+1	+1	29,67	86,62	33,87	86,30
-1	+1	+1	-1	55,73	57,69	55,68	62,94
-1	+1	-1	+1	31,47	85,28	42,00	82,48
-1	+1	-1	-1	47,40	66,48	59,87	52,85
-1	-1	+1	+1	33,53	81,80	40,40	76,78
-1	-1	+1	-1	53,80	53,83	67,93	35,25
-1	-1	-1	+1	27,47	84,52	41,73	59,86
-1	-1	-1	-1	54,20	52,95	66,07	41,16
+1	0	0	0	27,27	87,96	39,80	80,95
-1	0	0	0	39,60	75,02	60,13	55,04
0	+1	0	0	30,53	85,67	37,07	87,00
0	-1	0	0	32,13	86,43	38,13	81,00
0	0	+1	0	30,53	87,33	39,00	84,79
0	0	-1	0	31,80	86,82	40,20	83,74
0	0	0	+1	26,47	88,91	30,47	89,46
0	0	0	-1	38,80	80,56	51,73	70,15

$X_T$ , Temperatura normalizada;  $X_t$ , Tiempo normalizado;  $X_D$ , Concentración de disolvente orgánico normalizada (etanol o acetona);  $R_e$  y  $R_a$ , rendimiento en el proceso con etanol y con acetona respectivamente (porcentaje respecto a materia prima seca);  $L_e$  y  $L_a$ , cantidad extraída de lignina en el proceso con etanol y acetona respectivamente (porcentaje respecto a la cantidad de lignina inicial)

El análisis de regresión lineal múltiple se lleva a cabo con todos los términos de la ecuación [1], eliminando los términos cuyos valores de F de Snedecor sean menores que 4 y utilizando el método de Stepwise.

Las ecuaciones encontradas para las distintas variables dependientes son:

$$R_e = 33,37 - 7,72 \cdot X_T + 1,60 \cdot X_D - 9,41 \cdot X_C \quad [3]$$

$$L_e = 85,84 + 8,76 \cdot X_T + 7,25 \cdot X_C - 5,51 \cdot X_T^2 - 2,03 \cdot X_T \cdot X_t - 5,77 \cdot X_T \cdot X_C \quad [4]$$

$$R_a = 42,08 - 9,15 \cdot X_T - 10,06 \cdot X_C + 3,04 \cdot X_T \cdot X_t - 3,09 \cdot X_D \cdot X_C \quad [5]$$

$$L_a = 82,41 + 10,65 \cdot X_T + 3,84 \cdot X_t + 8,89 \cdot X_C - 10,35 \cdot X_T^2 - 5,00 \cdot X_T \cdot X_t - 5,36 \cdot X_T \cdot X_C + 2,69 \cdot X_D \cdot X_C \quad [6]$$

Los valores de F de Snedecor, múltiple-R,  $R^2$  y  $R^2$ -ajustada de los ajustes de las ecuaciones [3] a [4] se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Valores de F de Snedecor, múltiple-R,  $R^2$  y  $R^2$ -ajustada de las ecuaciones [3] - [6]

Proceso	Ecuación	F de Snedecor	Múltiple-R	$R^2$	$R^2$ -ajustada
Etanol	Rendimiento [3]	103,526	0,968	0,937	0,928
Clorhídrico	Lignina [4]	91,096	0,980	0,960	0,949
Acetona	Rendimiento [5]	47,226	0,951	0,904	0,885
Clorhídrico	Lignina [6]	41,474	0,972	0,945	0,922

El modelo proporciona un buen ajuste para los datos experimentales de las variables respuesta, como lo indican los valores de F de Snedecor, múltiple-R,  $R^2$ , y  $R^2$ -ajustada de la tabla 4. Los más bajos valores de estos parámetros para el caso de la cantidad extraída de lignina son debidos a pequeñas variaciones de la composición de la paja de trigo.

Para determinar que valores de las variables de operación proporcionan resultados óptimos de las variables dependientes, se ha aplicado la programación no lineal múltiple (33) siguiendo el método de More y Toraldo (34). En la tabla 5 se presentan los valores óptimos de las variables dependientes y los correspondientes valores requeridos para las variables independientes.

Tabla 5. Valores de las variables independientes para obtener los valores óptimos de las variables dependientes.

Variable dependiente	Valor óptimo de la variable dependiente	Valores normalizados de las variables independientes para obtener valores óptimos de las variables dependientes			
		$X_T$	$X_t$	$X_D$	$X_C$
$R_e$	52,10	-1		1	-1
$L_e$	94,23	0,45	-1		1
$R_a$	67,42	-1	-1	1	-1
$L_a$	97,83	0,01	1	1	1

En la figura 1 se pueden comprobar estos resultados para el caso del rendimiento de las pastas para ambos procesos. Se han representado las variaciones de esta variable en función la temperatura y la concentración de disolvente manteniendo el tiempo y la concentración de catalizador en sus valores más bajos.

De igual forma se pueden comprobar los resultados de la cantidad extraída de lignina de las pastas para ambos procesos como se muestra en la figura 2, donde se ha representado la cantidad extraída de lignina en función de la temperatura y del tiempo manteniendo la concentración de disolvente y de catalizador en sus valores más altos.

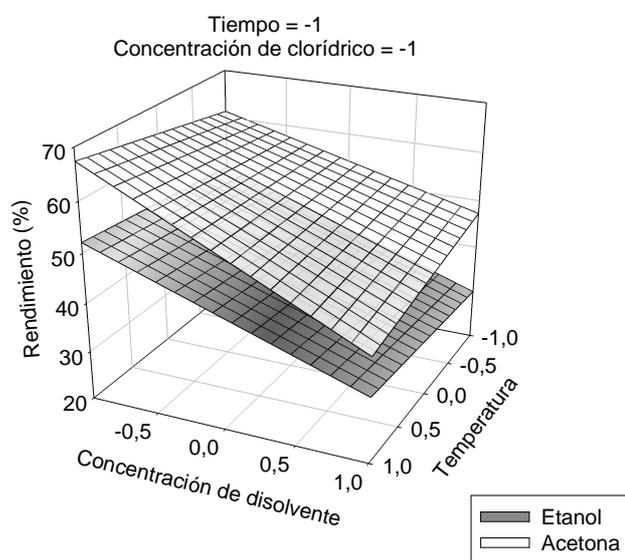


Figura 2. Variación del rendimiento con la temperatura y la concentración de disolvente manteniendo el tiempo y la concentración de catalizador en sus valores más bajos.

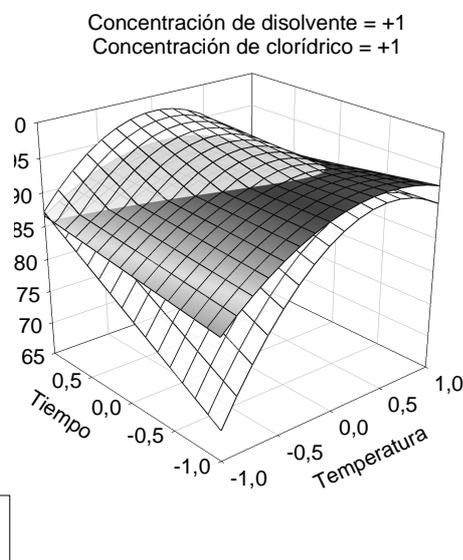


Figura 3. Variación de la cantidad de lignina extraída con la temperatura y el tiempo manteniendo la concentración de disolvente y de catalizador en sus valores más altos.

Al comparar ambos procesos (etanol y acetona) se observa que para el caso del rendimiento, con el proceso a la acetona se obtienen mayores resultados. Si comparando la cantidad extraída de lignina se deduce que para valores bajos de tiempo se extrae más lignina con el proceso al etanol, mientras que para valores altos de tiempo se extrae más lignina con el proceso a la acetona.

Si se opera con valores medio-alto de temperatura (183°C) y concentración de etanol (77,3%) y bajos de tiempo (30 minutos) y concentración de clorhídrico (0,001N) se consigue los resultados de rendimientos y cantidad extraída de lignina que se presentan en la tabla 5. En la misma tabla se presentan los valores de las variables de operación y los resultados conseguidos de rendimiento y cantidad extraída de lignina, para el proceso con acetona catalizado, para el que se ha fijado la temperatura (169,8°C), concentración de acetona (65,75%) y concentración de clorhídrico (0,006N) en un valor medio y el tiempo en un valor alto (120 minutos).

Comparando los procesos al etanol y a la acetona, ambos catalizados, se deduce del análisis de la tabla 6 que para obtener la misma cantidad extraída de lignina para el proceso con acetona se necesita menor temperatura con el consiguiente ahorro de energía de calentamiento y para el proceso con etanol se requiere menor tiempo de proceso con el aumento consecuente de la producción o disminución del tamaño de las instalaciones de procesado, obteniéndose en ambos procesos rendimientos muy similares.

Tabla 6. Variables de operación y resultados en el pasteado al etanol y a la acetona con catalizador, para obtener similar cantidad extraída de lignina.

Variables independientes y dependientes	Proceso con etanol	Proceso con acetona
Temperatura	0,65	-0,01
Tiempo	-1	1
Concentración de disolvente	0,82	0,05
Concentración catalizador	-1	0,1
Rendimiento, %	39,07	41,12
Lignina extraída, %	87,03	87,10

## CONCLUSIONES

El proceso Organosolv es un método efectivo para extraer la lignina de la paja de trigo con el objetivo de emplearla como biocombustible. El tratamiento provoca una solubilización parcial de la hemicelulosa y una concentración de la celulosa y la lignina cuya proporción depende de la severidad del tratamiento. Este proceso, junto con la obtención de bioetanol producido a partir paja de trigo, se muestra como una alternativa interesante, ya que estas materias primas se encuentran ampliamente distribuidas, no compiten con el mercado alimentario y son más baratas que los recursos agrícolas convencionales.

La utilización de etanol combinado con ácidos minerales se produce un aumento en la eficacia de extracción de la lignina, destacando entre ellos el ácido clorhídrico. Al comparar los procesos al etanol y a la acetona catalizados con ácido clorhídrico, se deduce que para obtener la misma cantidad de lignina, el proceso con acetona necesita menor temperatura con el consiguiente ahorro energético y el proceso con etanol requiere menor tiempo con el aumento de la producción o disminución del tamaño de las instalaciones de procesado.

En relación con las ligninas obtenidas, las Orgasolv presentan numerosas ventajas frente a las kraft. La temperatura de transición vítrea de las ligninas Organosolv, son más bajas, por lo son más fáciles de procesar térmicamente. Estas diferencias hacen interesante la utilización de lignina Organosolv como combustible térmico ya que presenta índices de fluidez más altos a igual temperatura y pueden alimentarse más fácilmente en la cámara de combustión de hornos y calderas. El contenido en cenizas de las ligninas Organosolv es pequeño, frente a las kraft lo que hace su combustión sea más limpia.

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. Ballesteros, I.; Negro, M.J.; Oliva, J.M.; Cabañas, A.; Manzanares, P.; Ballesteros, M. Ethanol production from steam-explosion pretreated wheat straw. *App. Biochem. Biotech.* 2006, 130, 496–508.
2. Talebnia, F.; Karakashev, D.B.; Angelidaki, I. Production of bioethanol from wheat straw: An overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation. *Biores. Tech.* 2010, 101, 4744–4753.
3. De Wilda, P.J.; Huijgen, W.J.J.; Heeres, H.J. Pyrolysis of wheat straw-derived organosolv lignin. *J. Anal. App. Pyr.* 2012, 93, 95–103.
4. Gómez, L.D.; Steele-King, C.G.; Mc Queen-Mason, S.J. Sustainable liquid biofuels from biomass: The writing's on the walls. *New Phyt.* 2008, 178, 473-485.
5. Lechón, Y.; Cabal, H.; Lago, C.; De la Rúa, C.; Sáez, R.; Fernández, M. Análisis del Ciclo de Vida de Combustibles alternativos para el transporte, Fase I. *Energía y Cambio Climático.* 2005.
6. BioPlat. Plataforma Tecnológica Española de la Biomasa. Documento de Visión a 2030. 2009
7. Limtong, S.; Sringiew, C.; Yongmanitchai, W. Production of fuel ethanol at high temperature from sugar cane juice by a newly isolated *Kluyveromyces marxianus*. *Bior. Tech.* 2009, 98, 3367-3374.
8. Sánchez, O.J. and Cardona C.A. Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bior. Tech.* 2008, 99, 5270-5295.
9. Bothast, R.J. and Schlicher, M.A. Biotechnological process for conversion of corn into ethanol. *App. Biochem. Biotech.* 2005, 67, 19-25.

10. Devantier, R.; Pedersen, S.; Olsson L. Characterization of very high gravity ethanol fermentation of corn mash. Effect of glucoamylase dosage, pre-saccharification and yeast strain. *App. Biochem. Biotech.* 2005, 68, 622-629.
11. Wang, S.; Thomas, K.C.; Sosulski, K.; Ingledew, W.M.; Sosulski, F.W. Grain pearling and very high gravity (VHG) fermentation technologies for fuel alcohol production from rye and triticale. *Process Biochem.* 2009, 34, 421-428.
12. Aggarwal, N.K.; Nigam, P.; Singh, D.; Yadav, B.S. Process optimization for the production of sugar for the bioethanol industry from Tapioca, a non-conventional source of starch. *World J. Ind. Microb. Biotech.* 2001, 17, 783-787.
13. Wang, Z.; Chen, M.; Xu, Y.; Li, S.; Lu, W.; Ping, S.; Zhang, W.; Lin, M. An ethanol-tolerant recombinant *Escherichia coli* expressing *Zymomonas mobilis* pdc and adhB genes for enhanced ethanol production from xylose. *Biotech. Letters.* 2008, 30, 657-663.
14. Blanco, M.I. and Azqueta, D. Can the environmental benefits of biomass support agriculture? The case of cereals for electricity and bioethanol production in Northern Spain. *Ener. Policy.* 2008, 36, 357-366.
15. Laopaiboon, L.; Thanonkeo, P.; Jaisil, P.; Laopaiboon P. Ethanol production from sweet sorghum juice in batch and fed-batch fermentations by *Saccharomyces cerevisiae*. *World J. Microb. Biotech.* 2007, 23, 1497-1501.
16. Zhan, X.; Wang, D.; Tuinstra, M.R.; Bean, S.; Seib, P.A.; Sun, X.S. Ethanol and lactic acid production as affected by sorghum genotype and location. *Ind. Crops Prod.* 2003, 18, 245-255.
17. Wyman, C.E. *Handbook on Bioethanol: Production and Utilization.* Taylor & Francis, Washington. 1996.
18. Kim, S. and Dale, B.E. Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. *Biomass Bioen.* 2004, 26, 361-375.
19. Moral, A.; Hernández, M.D.; Tijero, A.; González, Z.; García, J.; de la Torre, M.J. NIRS determination of carbohydrates from hydrothermal-treated rice straw. *Tappi J.* 2012, 11, 27-32.
20. Rodríguez, A.; Moral, A.; Serrano, L.; Jiménez, L. Residuos de la industria del aceite de palma como materia prima alternativa para la fabricación de papel. *Ing. Quím.* 2009, 468, 58-65
21. Moral, A.; Monte, M.C.; Cabeza, E.; Blanco, A. Morphological characterization of pulps to control paper properties. *Cell. Chem. Tech.* 2010, 44, 473-480
22. Ming, X.; Sheng-you, Z.; Wen-ying, F.; Zhen-hua, S.; Yu, Z. Study on Comprehensive Utilization of Wheat Straw XOS, Pulp and Energy. *International Conference on Future Energy, Environment, and Materials. Ener. Proc.* 2012, 16, 939-945.

23. Rodríguez, A.; Moral, A.; Serrano, L.; Labidi, J.; Jiménez, L. Rice straw pulp obtained by using various methods. *Bior. Tech.* 2008, 99, 2881–2886.
24. Jiménez, L.; Pérez, A.; Moral, A.; Serrano, L.; Angulo, V. Acid Hydrolysis of Lignocellulosic Residues from Pulping Processes as a Method of Obtaining Sugar for the Production of Ethanol. *Afinidad.* 2007, 64, 574-580.
25. Jiménez, L.; Pérez, I.; de la Torre, M.J.; López, F.; Ariza, J. Use of formaldehyde for making wheat straw cellulose pulp. *Bior. Tech.* 2000, 72, 283–288.
26. Jiménez, L.; de la Torre, M.J.; Ferrer, J.L.; García, J.C. Influence of process variables on the properties of pulp obtained by ethanol pulping of wheat straw. *Proc. Biochem.* 1999, 35, 143–148.
27. Jiménez, L.; de la Torre, M.J.; Bonilla, J.L.; Ferrer J.L. Organosolv pulping of wheat straw by use of acetone-water mixtures. *Proc. Biochem.* 1998, 33, 4111–4118.
28. Rodríguez, A.; Moral, A.; Sánchez, R.; Jiménez, L. Use of Diethanolamine to obtain Cellulosics Pulps from Solid Fraction of hydrothermal Treatment of Rice Straw. *Afinidad.* 2009, 66, 20-26
29. Rodríguez, A.; Serrano, L.; Moral, A.; Jiménez, L. Pulping of rice straw with high-boiling point organosolv solvents. *Biochem. Eng. J.* 2008, 42, 243-247.
30. Kim S. and Dale B.E. Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. *Biomass Bioen.* 2004, 26, 361-375.
31. TAPPI Standard. TAPPI Test Methods. Atlanta 1997.
32. Montgomery, D.C. Diseño y análisis de experimentos. Ed. Iberoamericana. Mexico 1991.
33. Press, W.H.; Teukolsky, S.A.; Vetterling, W.T.; Flannery, B.P. Numerical recipes in C: The art of scientific computing. Cambridge Univer. Press. Cambridge 1992.
34. More, A.; Toraldo, A. Algorithms for bound constrained quadratic programming problems. *Num. Math.* 1989, 55, 377-400.