



Análisis multivariado de la influencia de la explosión de vapor sobre la cascarilla de arroz

Multivariate analysis of the influence of steam explosion on rice husks

Ricardo Aaron Naveda Rengifo^{1*}; Paola Aurelia Jorge Montalvo¹; Lisveth Flores del Pino¹;
Lizardo Visitación Figueroa¹

¹ Departamento Académico de Manejo Pesquero y Medio Ambiente, Facultad de Pesquería, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

Recepción: 18/06/2019; Aceptación: 15/12/2019

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo analizar mediante el método de análisis por componentes principales (ACP), la influencia de los parámetros de diseño de la metodología de explosión de vapor sobre la remoción de lignina y variación de otras propiedades físicas en la cascarilla de arroz, residuo agrícola de amplio interés para la producción de etanol 2G. Mediante este proceso se facilita el acceso de enzimas en la hidrólisis de la celulosa. Del análisis se encontró que la presión y el factor de severidad (FS), parámetros del proceso explosión de vapor, se relacionan estrechamente con el pH del lixiviado y la cantidad remanente de lignina en la cascarilla, debido principalmente a la formación de ácidos débiles, autohidrólisis y reacciones de despolimerización - repolimerización de la lignina. Adicionalmente se encontró que otros parámetros como la humedad y la densidad aparente de la cascarilla se encuentran relacionadas entre sí debido a la retención del vapor de agua en los espacios porosos de la cascarilla y su capacidad higroscópica, de modo que un mayor tiempo de residencia favorece la retención de humedad.

Palabras clave: Cascarilla de arroz; análisis por componentes principales (ACP); explosión de vapor; factor de severidad (FS); lignina Klason.

Abstract

The objective of this study was to analyze the influence of the design parameters of the steam explosion methodology on the removal of lignin and the variation of other physical properties in the rice husk by means of the principal component analysis (ACP) method, agricultural residue of wide interest for the production of 2G ethanol. Through this process the access of enzymes in cellulose hydrolysis is facilitated. From the analysis it was found that the pressure

Forma de citar el artículo: Naveda *et al.*, 2019. Análisis multivariado de la influencia de la explosión de vapor sobre la cascarilla de arroz. Anales Científicos 80 (2): 569-579 (2019).

DOI: <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v80i2.1492>

Autor de correspondencia (*): Ricardo Aaron Naveda Rengifo. Email: aanaveda@gmail.com

© Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

and severity factor (FS), parameters of the steam explosion process, are closely related to the pH of the leachate and the remaining amount of lignin in the husk, mainly due to the formation of weak acids, autohydrolysis and depolymerization reactions - repolymerization of lignin. Additionally, it was found that other parameters such as humidity and bulk density of the rice husk are related to each other due to the retention of water vapor in the porous spaces of the husk and its hygroscopic capacity, so that a longer time of residence, favors moisture retention.

KeyWords: Rice husk; principal components analysis (PCA); steam explosion; severity factor (SF); lignin Klason.

1. Introducción

El arroz es la semilla de la planta *Oryza sativa* y está formado principalmente por la cariósipide y cáscara o cascarilla. Esta última representa entre el 20 y 22 % del peso seco del grano (Olmos, 2006) y posee muy bajo contenido de nutrientes por lo que luego del proceso de molienda del arroz se convierte en un subproducto (Huaripoma, 2015). De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), en el 2014 se produjeron aproximadamente 745 millones de toneladas de arroz, lo que dio como resultado la generación de aproximadamente 150 millones de toneladas de cascarilla de este cereal. En el Perú, este subproducto cuenta con muy pocas aplicaciones desarrolladas por lo que es común que sea dispuesto como residuo y muchas veces quemado como biomasa (Huaripoma, 2015). Métodos alternativos de reaprovechamiento para la producción etanol o uso como alimento animal requieren la remoción de lignina exponiendo a la celulosa al ataque enzimático.

La generación de residuos como la cascarilla de arroz y su manejo inadecuado se han convertido en serios problemas ambientales que están afectando a todas las personas del planeta debido a la contaminación de ecosistemas, contribución al cambio climático, transmisión de enfermedades y afectación del turismo

(Kaza *et al.*, 2018). Ante esta situación, las organizaciones internacionales como las Naciones Unidas (ONU), así como los gobiernos de diferentes países vienen implementando y fomentando políticas de desarrollo sostenible que permitan mitigar y controlar los efectos adversos ocasionados por esta problemática. En el Perú, la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos (Ley N° 1278), establece los principios para el adecuado manejo de los residuos sólidos, priorizando la valorización por sobre la disposición final.

Bajo este contexto, surge la necesidad de encontrar aplicaciones de la cascarilla de arroz o formas de valorizar dicho residuo, de modo que se evite su disposición final inmediata o la quema como medida de control de pupas de insectos y remoción de tallos enfermos (Heros, 2013). Una alternativa para la revalorización de la cascarilla es la producción de etanol, se estima que de 5 a 5,3 toneladas métricas de residuos se podría obtener un metro cúbico de etanol (Visitación, 2019). Por ello, resulta imprescindible conocer las características fisicoquímicas de este subproducto y cómo estas se ven afectadas bajo determinadas condiciones del proceso de producción, como por ejemplo, durante el pretratamiento explosión de vapor. Este pretratamiento consiste en someter a la biomasa a altas presiones y temperaturas durante un tiempo de residencia específico y luego liberar la presión rápidamente para generar un efecto

parecido al de una explosión, el cual produce la descomposición de la biomasa (Verardi *et al.*, 2017).

El presente estudio tuvo como objetivo analizar la influencia que tienen los parámetros de diseño del pretratamiento explosión de vapor sobre su capacidad para remover lignina de la cascarilla de arroz, con ello se espera encontrar las relaciones entre las variables estudiadas y que los resultados sirvan como base para mejorar los procesos de producción de etanol. El análisis se llevó a cabo utilizando el método estadístico multivariado llamado análisis por componentes principales (ACP), el cual permite encontrar posibles relaciones de causa efecto entre las variables estudiadas (Jolliffe, 2002)

2. Materiales y métodos

Materia prima

La materia prima que se utilizó fue cascarilla de arroz, variedad IR – 43 o NIR (nombre comercial), proveniente de la ciudad de Chiclayo, producido por la Asociación Peruana de Molineros de Arroz (APEMA) y Molino Sudamérica. La cascarilla fue almacenada en sacos de polietileno negros protegida de la lluvia y radiación solar.

Explosión de vapor

La explosión de vapor se llevó a cabo utilizando un equipo piloto a pequeña escala (sistema batch), constituido por un reactor de 15 litros de capacidad, un calderín y una manguera que conecta a los dos primeros. El modo de funcionamiento consiste en generar vapor de agua a alta presión en el calderín a través de dos resistencias eléctricas para luego, haciendo uso de la manguera y dos válvulas, transferirlo al reactor donde entra en contacto con la biomasa; finalmente, luego de transcurrido un tiempo específico, se libera la presión mediante una válvula y un tubo con ensanchamiento para que la presión descienda rápidamente ocasionando

el efecto de una explosión dentro del reactor. El procedimiento que se llevó a cabo consistió en agregar 600 gramos de cascarilla de arroz al reactor, sometiéndola a presiones de 4, 6, 8 y 10 bar con tiempos de residencia de 6, 8, 10 y 12 minutos. La presión fue controlada mediante un manómetro acoplado a la tapa del reactor y el tiempo fue controlado con un cronómetro. Al finalizar el proceso, se abrió la válvula de purga del reactor ubicada en su base para recoger el lixiviado y luego se retiró la tapa del reactor para recoger la cascarilla de arroz tratada. En la Figura 1 se observa el equipo explosión de vapor y sus componentes.

Determinación de pH

La determinación del pH se realizó a partir del lixiviado resultante del proceso explosión de vapor. Las mediciones fueron realizadas por duplicado utilizando medidor de pH modelo HQ40D.

Determinación de humedad y densidad aparente

La determinación de humedad y densidad aparente se realizó una vez finalizada la medición de pH del lixiviado. Para el análisis de humedad se empleó el método gravimétrico utilizando crisoles de cerámica, balanza analítica y estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$, según la norma ASTM D 1762; mientras que para el análisis de densidad aparente se empleó el método de la probeta (método no estandarizado) utilizando probeta de 500 mL y balanza electrónica. Ambos análisis se realizaron por duplicado.

Determinación del contenido de lignina Klason

La determinación del contenido de lignina Klason, llamada también lignina insoluble en medio ácido (LIA), se realizó una vez finalizados todos los experimentos con el equipo explosión de vapor, haciendo uso

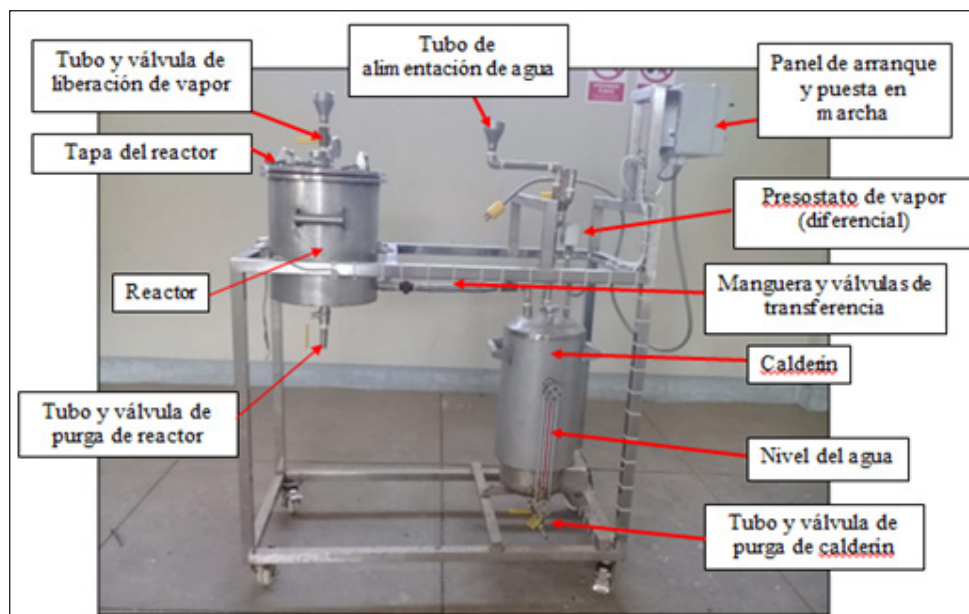


Figura 1. Equipo explosión de vapor

de la cascarilla tratada que fue almacenada a 4°C luego de cada experimento. Para la determinación del contenido de lignina se empleó el método Lignina Klason, siguiendo los procedimientos de laboratorio establecidos por National Renewable Energy Laboratory (NREL).

Los procedimientos fueron preparación de la muestra (NREL/TP-510-42620), determinación de humedad y sólidos totales (NREL/TP-510-42621), determinación de material extraíble (NREL/TP-510-42619), determinación de lignina (NREL/TP-510-42618).

Diseño experimental

Considerando que los factores principales que influyen en la explosión de vapor son la presión y el tiempo de residencia a los que es sometida la biomasa, se planteó desarrollar un diseño experimental completamente al azar (DCA) aplicando un arreglo factorial completo, donde la unidad experimental fue la cascarilla de arroz, los factores fueron la presión manométrica (bar) y el tiempo de residencia (minutos), y las variables

respuestas fueron el pH del lixiviado y la humedad, densidad aparente y contenido de lignina de la cascarilla de arroz.

El arreglo consideró cuatro niveles para cada factor con dos repeticiones (4x4x2) más un control o blanco que fue la cáscara de arroz sin aplicarle ningún pretratamiento. En la [Tabla 1](#) se muestran los factores y niveles del diseño experimental.

Determinación del factor de severidad

Para determinar el factor de severidad (FS) se requirió primero encontrar la relación entre la presión y temperatura en el reactor, en ese sentido se realizó mediciones de dichas variables durante la aplicación de alguno de los experimentos. Las mediciones se realizaron cada minuto, siendo el minuto cero desde que empezaba a transferirse el vapor del calderín al reactor. El tiempo se midió utilizando un cronómetro y la lectura de presión y temperatura se realizó con el manómetro y termómetro de aguja respectivamente implementados en la tapa del reactor.

Tabla 1. Factores y niveles del diseño experimental

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Control ^(*)
Presión (Bar)	4	6	8	10	0
Tiempo (min)	6	8	10	12	0

^(*) Se considerará para el control, la exposición al ambiente, es decir a presión manométrica igual a cero y sin tiempo de residencia.

Determinación del factor de severidad

Para determinar el factor de severidad (FS) se requirió primero encontrar la relación entre la presión y temperatura en el reactor, en ese sentido se realizó mediciones de dichas variables durante la aplicación de alguno de los experimentos. Las mediciones se realizaron cada minuto, siendo el minuto cero desde que empezaba a transferirse el vapor del calderín al reactor. El tiempo se midió utilizando un cronómetro y la lectura de presión y temperatura se realizó con el manómetro y termómetro de aguja respectivamente implementados en la tapa del reactor.

Con la información recolectada se procedió a crear una curva de presión-temperatura y a encontrar el modelo matemático que mejor se ajustase al comportamiento observado en el reactor. De este modo se logró obtener un valor de temperatura para cada valor de presión y con esta a su vez, calcular el factor de severidad (FS) de cada experimento utilizando la ecuación 1, formulada por Overend y Chornet en 1987 (Stelte, 2013) and makes the biomass polymers more accessible for subsequent processes, i.e. fermentation, hydrolysis or densification processes. Biomass materials such as wood are composite materials with high mechanical strength. The major components are cellulose, embedded in a matrix of lignin and hemicelluloses (Fengel, 1983).

$$SF = \text{Log}_{10} \left[t \times \exp\left(\frac{T-100}{14.75}\right) \right] \quad (\text{Ecuación 1})$$

Análisis estadístico

El análisis estadístico de los resultados se basó en un análisis multivariado aplicando el método de análisis por componentes principales (ACP). Los factores o variables que se analizaron fueron presión, tiempo, factor de severidad (FS), pH del lixiviado, humedad, densidad aparente y contenido de lignina de la cascarilla de arroz. Para este análisis se utilizó el software Minitab 17®.

3. Resultados y discusión

En primer lugar se determinó el factor de severidad para cada experimento, para lo cual se construyó un modelo matemático que describiese la relación entre la presión y temperatura del reactor utilizando el método de iteraciones Gauss – Newton. En la Figura 2 se muestra la curva que relaciona el comportamiento de la temperatura en función a la presión. En ella se observa que la temperatura y la presión están relacionadas entre sí describiendo una función exponencial. Este comportamiento se debe a que desde el calderín ingresa al reactor vapor de agua saturado a altas temperaturas, haciendo que en primera instancia la presión aumente y enseguida lo haga la temperatura (Stelte, 2013). El modelo matemático encontrado fue el siguiente:

$$T = 82,0997 \times P^{0,326452}$$

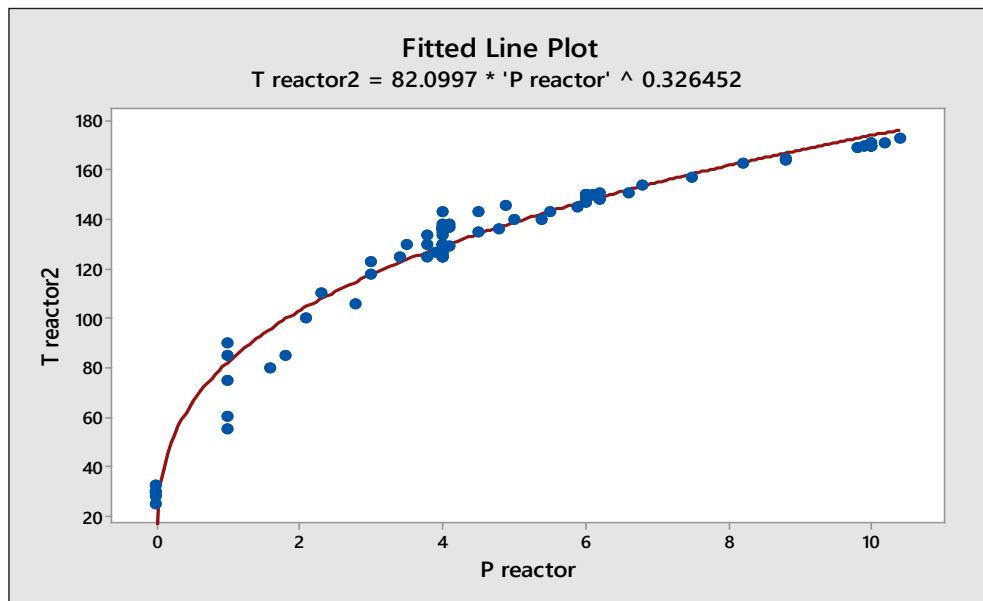


Figura 2. Curva que relaciona presión (bar) y temperatura (°C)

Una vez obtenido el modelo matemático, fue posible calcular el FS para los cuatro niveles de presión y tiempo con los que se trabajó en los experimentos utilizando la ecuación 1. El FS fue considerado posteriormente en el ACP debido a que está asociado a la explosión de vapor y los efectos que este produce sobre la biomasa (Maniet *et al.*, 2017). En la [Tabla 2](#) se muestra los FS calculados, en ella se puede apreciar como el FS incrementa a medida que aumenta la temperatura y el tiempo de residencia. Estos valores permiten comparar entre un experimento y otro que tan severos fueron los efectos de las explosiones generadas en el reactor (Jakobson *et al.*, 1995)

Por otra parte, en la [tabla 3](#) se muestran los resultados promedios obtenidos en los experimentos, pudiéndose apreciar que el pH del lixiviado al aplicar la explosión de vapor estuvo comprendido en el rango de 7,0 a 4,2; la humedad de la cascarilla estuvo en el rango de 17,8 a 31,9%; la densidad

aparente estuvo en el rango de 123,6 a 137,3 kg/m³ y el contenido de lignina estuvo en el rango de 12,7 y 17,4 %. Las diferencias que existen entre los valores máximos y mínimos hacen sospechar que existe una fuente de variabilidad en estos factores, la cual podría ser los efectos que produce la explosión de vapor. En ese sentido, resulta conveniente identificar las principales relaciones entre los factores involucrados en este proceso que puedan ser de causa y efecto aplicando el método estadístico multivariado de análisis por componentes principales (ACP).

Para realizar el ACP se transformó linealmente el conjunto de variables estudiadas en otro de nuevas variables (componentes principales – PC) no correlacionadas entre sí, de modo que estos nuevos conjuntos permitiesen conocer la variabilidad presente en el conjunto de datos originales. En la [Tabla 4](#) se muestra los valores propios o eigenvalores resultantes del ACP, en ella se pueda apreciar que se

calculó siete componentes principales, de los cuales, PC1 y PC2 fueron los que presentaron los mayores valores propios, representando entre ambos casi el 75 % de la variabilidad total de los datos. Considerando ello y aplicando el criterio de Kaiser (Jolliffe, 2002), que establece que se deben utilizar solo aquellos componentes principales cuyos valores propios sean mayores a 1, se tomó en cuenta para el análisis de vectores propios o eigenvectores a los componentes principales PC1 y PC2.

El análisis de los vectores propios o eigenvectores permitió conocer la importancia de los factores estudiados sobre la variabilidad de los datos, así como las posibles relaciones que pudiesen existir entre ellos. En la tabla 5 se muestran los vectores propios resultantes del ACP, en ella se aprecia que para PC1, los vectores más grandes correspondieron a la presión (-0,510), FS (-0,518), pH del lixiviado (0,462) y lignina (0,442); la magnitud superior de dichos vectores con respecto al resto significa que son los que mejor explican la variabilidad de datos para PC1. Asimismo, se observa que sus coeficientes son similares entre sí, lo cual significa que dichos factores estarían relacionados. Finalmente, se observa que los vectores de presión y FS son negativos, mientras que los vectores del pH y lignina son positivos; esto indica que la relación entre ellos es inversa, es decir, a medida que aumenta la presión y el FS, disminuirá

el pH del lixiviado y el contenido de lignina de la cascarilla. Lo indicado anteriormente puede ser deducido también del gráfico de influencias (Figura 2), donde se observa que las variables antes mencionadas se acercan al eje horizontal (eje PC1); además, los vectores de la presión y FS se ubican al extremo izquierdo del gráfico (región negativa), mientras que los vectores de pH y lignina se ubican al extremo derecho (región positiva), dibujando líneas casi rectas entre ellas.

Por otra parte, en la Tabla 5 se observa que para PC2, los vectores de humedad y densidad aparente (0,626 y 0,678 respectivamente) son considerablemente mayores al resto, seguidos inmediatamente por el vector del tiempo (0,316). La interpretación de estos resultados es que para PC2, la humedad y densidad aparente son los factores que mejor explica la variabilidad de los datos; además, el hecho que los coeficientes de sus vectores sean similares entre sí, permite deducir que existe una relación estrecha entre ellos y una relación menos estrecha con el tiempo, cuyo vector posee un coeficiente menor. Lo indicado anteriormente puede ser identificado también del gráfico de influencias (Figura 3), donde se observa que los vectores de humedad y densidad poseen casi el mismo tamaño y orientación, mientras que el tiempo posee un menor tamaño pero orientación similar hacia la parte superior del gráfico.

Tabla 2. Factores de severidad (FS) calculados

Presión (bar)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)			
		6	8	10	12
4	129,1	1,63	1,76	1,86	1,94
6	147,4	2,17	2,30	2,39	2,47
8	161,9	2,60	2,72	2,82	2,90
10	174,1	2,96	3,08	3,18	3,26

Tabla 3. Resultados de experimento explosión de vapor

Presión (bar)	Tiempo (min)	FS	pH	Humedad (%)	Densidad aparente (kg/m ³)	Lignina (%)
0 (a)	0 (a)	0 (a)	-	7,80 ± 0,3	128,3 ± 2,9	18,0 ± 1,0
4	6	1,63	6,8 ± 0,0	23,0 ± 0,9	130,1 ± 3,1	15,9 ± 0,1
4	8	1,76	6,9 ± 0,1	23,9 ± 2,7	127,9 ± 1,3	15,6 ± 1,1
4	10	1,86	6,8 ± 0,3	22,7 ± 0,8	132,4 ± 3,0	16,9 ± 0,7
4	12	1,94	6,2 ± 0,0	31,9 ± 4,7	137,1 ± 6,6	17,4 ± 0,2
6	6	2,17	7,0 ± 0,2	20,6 ± 1,1	131,7 ± 3,2	14,9 ± 1,5
6	8	2,30	6,2 ± 0,0	22,6 ± 1,2	133,7 ± 2,8	14,3 ± 0,3
6	10	2,39	6,7 ± 0,1	23,7 ± 1,1	128,0 ± 2,8	17,1 ± 0,5
6	12	2,47	5,9 ± 0,0	21,9 ± 3,1	128,5 ± 1,7	15,0 ± 1,0
8	6	2,60	6,4 ± 0,0	24,3 ± 1,8	129,0 ± 2,3	14,6 ± 0,4
8	8	2,72	5,4 ± 0,7	24,3 ± 1,6	131,0 ± 2,6	13,7 ± 0,6
8	10	2,82	5,0 ± 0,0	18,1 ± 1,8	125,5 ± 2,0	14,9 ± 0,6
8	12	2,90	4,3 ± 0,7	17,8 ± 2,8	127,3 ± 4,4	13,5 ± 0,7
10	6	2,96	4,7 ± 0,1	19,4 ± 1,7	123,6 ± 1,6	14,2 ± 0,4
10	8	3,08	4,4 ± 0,0	19,2 ± 0,8	128,7 ± 7,6	13,4 ± 0,8
10	10	3,18	4,4 ± 0,0	25,9 ± 2,5	131,4 ± 4,4	12,8 ± 0,6
10	12	3,26	4,2 ± 0,0	24,5 ± 1,2	137,3 ± 0,4	12,7 ± 1,2

Nota: Resultados ± Desviación Estándar para dos muestras por duplicado (para lignina por triplicado)

(a) Condiciones del control o blanco

Tabla 4. Valores propios o eigenvalores resultantes del ACP

PC	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
Valor propio	3,471	1,795	1,015	0,405	0,203	0,106	0,003
Proporción	0,496	0,256	0,145	0,058	0,029	0,015	0,000
Acumulada	0,496	0,752	0,897	0,955	0,984	1,000	1,000

Tabla 5. Vectores propios resultantes del ACP

Variables	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
Presión	- 0,510	0,041	0,197	- 0,217	- 0,406	- 0,038	- 0,697
Tiempo	- 0,073	0,316	- 0,872	0,245	- 0,120	- 0,173	- 0,172
FS	- 0,518	0,100	- 0,004	- 0,128	- 0,453	- 0,136	0,694
pH lixiviado	0,462	- 0,178	0,185	0,421	- 0,632	- 0,379	- 0,039
Humedad	0,213	0,626	0,207	- 0,360	0,162	- 0,603	- 0,010
Densidad aparente	0,116	0,678	0,223	0,282	- 0,211	0,594	0,021
Lignina	0,442	- 0,076	- 0,271	- 0,700	- 0,382	0,299	0,019

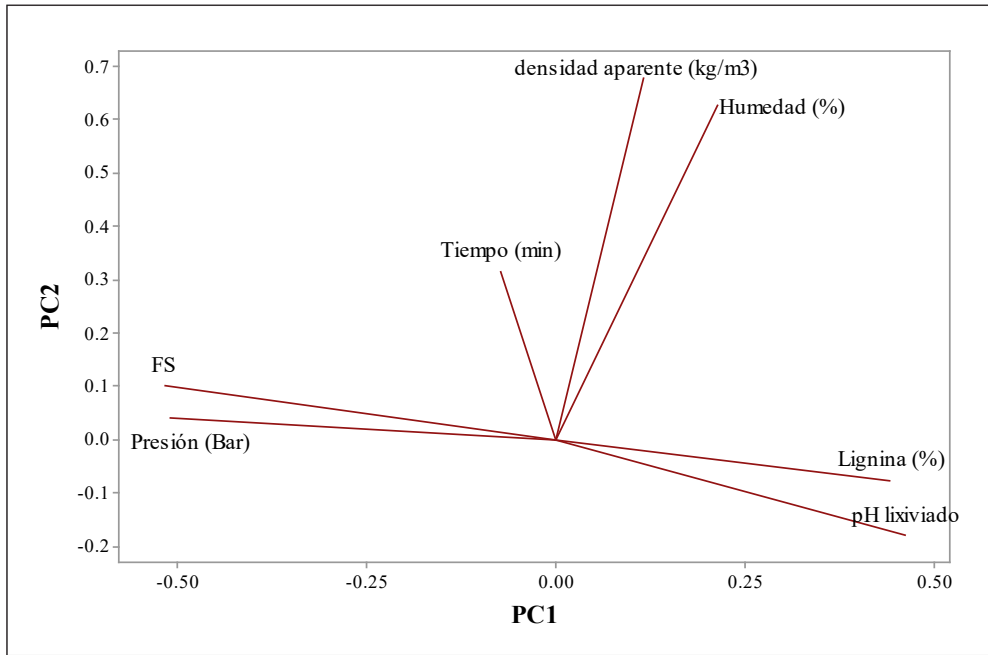


Figura 3. Gráfico de influencias de los factores analizados mediante ACP

El ACP permitió identificar que el contenido de lignina y pH del lixiviado se ven fuertemente influenciados por la presión y el FS aplicados en el proceso explosión de vapor. En el caso de la variación (disminución) del pH, esta respondería a la formación de ácidos orgánicos de cadena corta como el ácido acético, generados a partir de los grupos acetilos de la hemicelulosa de la cascarilla, producto del aumento de la presión y temperatura en el reactor (Moniruzzaman, 1996). Este mismo hecho, contribuiría a la variación del contenido de lignina, ya que el medio ácido favorece a la autohidrólisis de la lignina (Jakobson *et al.*, 1995) además de favorecer a que se den simultáneamente reacciones de despolimerización y repolimerización de la misma (Li *et al.*, 2007)

Se encontró también que existe una relación cercana entre la humedad y densidad aparente y una relación menos estrecha de estas mismas variables con el tiempo

de residencia. La relación entre las dos primeras variables respondería a que durante el proceso explosión de vapor la cascarilla de arroz entra en contacto con vapor de agua saturado, el cual puede ser retenido por las cascarilla debido a que esta posee un volumen poroso de 54% aproximadamente (Cadena y Bula, 2002), haciendo que su contenido de humedad y densidad aparente aumenten. Asimismo, Guo *et al.*, (2019) indicaron que la biomasa rica en lignina, como la cascarilla de arroz, posee una gran capacidad higroscópica debido a que la lignina posee varios grupos hidrofílicos que son potenciales sitios para absorber y retener agua, lo cual contribuiría también a que la humedad y densidad aparente de la cascarilla varíen. Cabe mencionar además que un mayor tiempo de exposición ocasionaría que la probabilidad de que los espacios porosos de la cascarilla sean ocupados por vapor de agua aumente.

4. Conclusiones

La explosión de vapor ocasionó efectos sobre la remoción de lignina y otras propiedades físicas en la cascarilla de arroz. Dichas variaciones respondieron a relaciones específicas entre las variables estudiadas, las cuales fueron identificadas mediante ACP. La principal relación encontrada involucró a la presión, FS, pH del lixiviado y contenido de lignina de la cascarilla, donde el aumento de las dos primeras ocasionó la disminución de las dos últimas debido, principalmente, a la formación de ácidos débiles durante el proceso de explosión de vapor. Una segunda relación identificada fue entre el contenido de humedad y densidad aparente de la cascarilla, cuyas variaciones responderían a la absorción de vapor de agua durante el tiempo que la cascarilla permanece en contacto con el vapor dentro del reactor. Los resultados encontrados permitirán que posteriores investigaciones centren sus esfuerzos en lograr una mayor remoción de lignina para que el sustrato se encuentre más expuesto al ataque de enzimas en el proceso de hidrólisis y lograr un mejor rendimiento en la producción de etanol de segunda generación, así como también en la mejora de la digestibilidad de los sustratos tratados para la formulación de alimento animal.

5. Agradecimientos

Se agradece al Programa Nacional de Innovación Agraria – PNIA, Fondo Concursable Investigación Estratégica Priorizada del concurso N° 2-IE-PNIA-2016, patrocinadores del Proyecto Producción de etanol de 2da generación G-2 a partir de residuos agroindustriales de caña, arroz y maíz, por su apoyo en el desarrollo de la presente investigación.

6. Literatura citada

Cadena, C.; Bula, A.J. 2002. Estudio de la variación en la conductividad térmica

de la cascarilla de arroz aglomerada con fibras vegetales. Universidad Del Norte Colombia.

- Guo, X.; Yuan, H.; Xiao, T.; Wu, Y. 2019. Application of micro-FTIR spectroscopy to study molecular association of adsorbed water with lignin. *International Journal of Biological Macromolecules* 131: 1038-1043.
- Heros Aguilar, E. 2013. Manejo integrado en el cultivo de arroz. Guía Técnica - Agrobanco. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Huaripoma Vega, D.A. 2015. Diseño de un Gasificador Downdraft invertido de 2600 Kcal/h que emplea Cascarilla de Arroz como Combustible. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Jakobson, J.; Hortling, B.; Sundquist, J. 1995. Characterization of Alkali Soluble Fraction of Steam Exploded Birch Wood. *Holzforschung* 49(1): 51–59.
- Jolliffe, I. T. 2002. Principal Component Analysis. Second Edition. Springer Series in Statistics 98.
- Kaza, S.; Yao, L.; Bhada-Tata, P.; Van Woerden, F. 2018. What a Waste 2.0 A Global Snapshot of Solid waste Management to 2050.
- Li, J.; Henriksson, G.; Gellerstedt, G. 2007. Lignin depolymerization / repolymerization and its critical role for delignification of aspen wood by steam explosion. *Bioresource Technology* 98(16): 3061–3068.
- Maniet, G.; Schmetz, Q.; Jacquet, N.; Temmerman, M.; Gofflot, S.; Richel, A. 2017. Effect of steam explosion treatment on chemical composition and characteristic of organosoluble fescue lignin. *Industrial Crops and Products*, 99, 79–85.

- Moniruzzaman, M. 1996. Effect of steam explosion on the physicochemical properties and enzymatic saccharification of rice straw. *Applied Biochemistry and Biotechnology - Part A Enzyme Engineering and Biotechnology* 59(3):283-297.
- Olmos, S. 2006. Apuntes de morfología, fenología, ecofisiología y mejoramiento genético del arroz. UNNE, 1–13.
- Stelte, W. 2013. Steam explosion for biomass pre-treatment. Danish Technological Institute 1–15.
- Verardi, A.; Blasi, A.; Marino, T.; Molino, A.; Calabrò, V. 2017. Effect of steam-pretreatment combined with hydrogen peroxide on lignocellulosic agricultural wastes for bioethanol production: Analysis of derived sugars and other by-products. *Journal of Energy Chemistry*.
- Visitación, L. 2019. Producción de etanol de 2da generación G2 a partir de residuos agroindustriales de caña, arroz y maíz. Taller de cierre del proyecto. *Proyectos de Investigación Estratégica Priorizada 2016. PNIA 2016*.