

LA DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA DE LA CASCARILLA DE ARROZ: UNA ALTERNATIVA DE APROVECHAMIENTO INTEGRAL

Thermal decomposition of rice husk: an alternative integral use

Abelardo Prada¹, Caroll E. Cortés²

Grupo de Investigación: Gestión Ambiental Sostenible – GiGAS. Universidad de los Llanos. Villavicencio, Meta. Colombia

¹Ing. Qco, PhD, Prof. Titular. Universidad de los Llanos. E-mail: aprada@unillanos.edu.co

²Qco. Esp. Gestión ambiental, Profesora Unillanos. E-mail: carolledith@hotmail.com

RESUMEN

El presente trabajo se orientó a capturar los gases de combustión de la cascarilla de arroz para transformarlos en carbonato de calcio (CaCO_3), sustancia útil en labores agrícolas.

Se demostró que los gases de combustión de la cascarilla pueden ser capturados en soluciones acuosas de KOH y NaOH, de las cuales se obtiene CaCO_3 con la adición de CaCl_2 en solución acuosa.

Se determinaron las características del proceso de combustión (masa de cascarilla, temperatura y masa de ceniza), de la captura de los gases (tiempo de reacción, pH y t, (°C)), de la precipitación del CaCO_3 (masa de CaCl_2 requerida) y la masa de CaCO_3 obtenido.

Palabras clave: Combustión, aprovechamiento integral, captura de dióxido de carbono, carbonato de calcio, uso agrícola.

SUMMARY

The present work was aimed at capturing the gases of combustion of rice husk to transform them into calcium carbonate (CaCO_3), a substance useful in agriculture.

It was shown that the combustion gases from the rice husk can be captured in aqueous solutions of KOH and NaOH, of which CaCO_3 is obtained by adding CaCl_2 aqueous.

Characteristics were determined from the combustion process (mass scale, temperature and mass of ash) of the capture of gases (reaction time, pH and t ° C), the precipitation of CaCO_3 (mass of CaCl_2 required) and the mass CaCO_3 obtained.

Key words: Combustion, integral use, capture of carbon dioxide, calcium carbonate, land use.

INTRODUCCIÓN

La cascarilla de arroz es uno de los desechos más importantes de la producción de arroz de la Orinoquía colombiana. La cantidad de cascarilla que se genera, año tras año en la región, puede superar las 100.000 ton / año (Martínez, 2005), con el agravante, que por su baja degradabilidad natural, se acumula en el ambiente, llevando a condiciones extremas la, de por sí, grave situación imperante.

La cascarilla de arroz es de consistencia quebradiza, abrasiva y su color varía del pardo rojizo al púrpura oscuro. Su densidad es baja, por lo cual al apilarse ocupa grandes espacios. El peso específico es de 125 kg/ m³, es decir, 1 tonelada ocupa un espacio de 8 m³ a granel (Varón 2005). La composición química de la cascarilla de arroz y de sus cenizas se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición Química de la Cascarilla de Arroz y de las Cenizas de la Cascarilla de Arroz

CASCARILLA DE ARROZ		GENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ	
Componente	%	Componente	%
Carbono	39,1	Ceniza de Sílice(SiO ₂)	94,1
Hidrógeno	5,2	Oxido de Calcio (CaO)	0,55
Nitrógeno	0,6	Oxido de magnesio (MgO)	0,95
Oxígeno	37,2	Oxido de Potasio (K ₂ O)	2,10
Azufre	0,1	Oxido de Sodio(Na ₂ O)	0,11
Cenizas	17,8	Sulfato	0,06
		Cloro	0,05
		Oxido de titanio (TiO ₂)	0,05
		Oxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	0,12
		Otros componentes (P ₂ O ₅ , F ₂ O ₃)	1,82
Total	100,0	Total	100,0

Fuente: 1. Varón C.J. Diseño, construcción y puesta a punto de un prototipo de quemador para la combustión continua y eficiente de la cascarilla de arroz. *El Hombre y la Máquina* 2005, 25. 128-135

2. Peña S, Zambrano G. Hormigón Celular con la Utilización de Materiales Locales. Tesis De Grado. Escuela Superior Politécnica del Litoral. 2001

El poder calorífico de la cascarilla es de 3.281,6 Kcal/kg. Debido a la estructura cerrada, la combustión se dificulta, y, por el alto contenido de sílice (el 20 %), es de muy baja biodegradabilidad en condiciones del ambiente natural. La temperatura máxima que se obtiene al ser quemada varía de acuerdo con su condición: 970°C (seca), 650°C (con algún grado de humedad) y hasta los 1000°C (mezclada con combustible). La cascarilla de arroz al quemarse, genera 17.8 % de ceniza rica en Sílice (94.5 %), (Varón 2005, Valverde, 2007)

Usos de la cascarilla de arroz

Dada la importante generación y acumulación, han sido diversos los ensayos de aprovechar la cascarilla de arroz en diferentes campos y por intermedio de diferentes métodos, para lograr materiales que se utilicen de manera inmediata y directa o a través de etapas previas que viabilicen el uso posterior del residuo pretratado.

Las experiencias más relevantes que se puedan citar, a nivel nacional, se exponen en la Tabla 2

Tabla 2. Estudios Sobre Alternativas de uso de Cascarilla de Arroz

A. Obtención de etanol por vía fermentativa.
B. Tostado para su uso como sustrato en el cultivo de flores.
C. Generación de energía (ladrilleras, secado de arroz y cereales).
D. Combustión controlada para uso como sustrato en cultivos hidropónicos.
E. Obtención de concreto, cemento y cerámicas.
F. Aprovechamiento de la cascarilla de arroz en compostaje y como lecho filtrante para aguas residuales.
G. Obtención de materiales adsorbentes.
H. Fuente de sustancias químicas (carboximetilcelulosa de sodio; dióxido de SiO ₂ , Nitruro de silicio; furfural)
I. Producción de aglomerados (tableros).
J. Material aislante en construcción.
K. Cama en avicultura, porcicultura y en transporte de ganado.
L. Cenizas en cultivos (Frutas)

Fuente: 1. Piñeros Y, Otálvaro A. Evaluación de la producción de etanol a partir de cascarilla de arroz pretratada con NaOCl, mediante hidrólisis y fermentación simultáneas XIII congreso de Biotecnología y Bioingeniería VII Simposio internacional Producción de etanoles y levaduras. México 2009

Dentro de las experiencias, expuestas en la Tabla 2, a nivel nacional, se pueden identificar las siguientes tendencias:

1. Ensayos de descomposición de la cascarilla de arroz por medios biológicos o con la ayuda de reactivos químicos para obtener un producto final (Alternativas A, E, H).
2. Material de relleno que, a posteriori, será desechado (Alternativa K).
3. Uso como aditivos para obtener otros materiales (Alternativas I, J).
4. Tratamiento térmico previo con el objetivo de darle uso posterior definitivo (Alternativa B, D, I).
5. Uso como fuente de energía (Alternativa C).

Limitantes del uso de la cascarilla de arroz

Las experiencias realizadas en cada una de estas tendencias han tenido que superar obstáculos importantes, puesto que los productos obtenidos no han logrado un uso proyectado, en razón a que las investigaciones en su gran mayoría, no han llegado a la etapa de implementación a escala, en consecuencia, no se cuenta con información real del total de cascarilla de arroz consumida en cada

alternativa, ni se han realizado estudios de viabilidad técnica, económica y ambiental.

Las dificultades encontradas en cada grupo de experiencias, están directamente relacionadas con las características de la cascarilla de arroz, por tanto tienen relación con los siguientes aspectos:

1. Los ensayos de desintegrar la cascarilla de arroz, por medios biológicos, se dificultan dado el alto contenido de silicio (cerca del 17 %, Tabla 1), elemento que la convierte en un material de muy baja degradabilidad. En trabajos prácticos se ha demostrado que muy pocos organismos vivos se nutren de ella (Cortes 1999) y por tanto persiste y se acumula en el ambiente natural.
2. Algo similar sucede en el caso de utilizar la cascarilla como relleno en camas para la producción porcícola o avícola. Aunque, en el primer caso (la producción porcícola), el uso de la cascarilla, reduce de manera sensible el consumo de agua, puesto que la cama no es exigente en el uso del recurso hídrico en la limpieza, no se conocen datos sobre el uso posterior del residuo, después del contacto físico con los animales, su orina y excretas. Algo similar se presenta con las camas de la producción avícola. Sin duda este podría ser un campo a estudiar con el propósito de encontrar un uso importante para la cascarilla.

3. El propósito de adicionar la cascarilla a otros materiales para obtener cementos, concreto, puzolanas o aglomerados, se encuentra con una importante dificultad, relacionada con el hecho que la cascarilla de arroz es muy pobre en los elementos requeridos, por ejemplo, en la producción de cemento. Este hecho se evidencia, al comparar, la composición de la cascarilla (Tabla 1) con la composición química de un cemento común (Tabla 3), en especial en el contenido de óxido de calcio. Por tanto los cementos y los materiales que se han obtenido con base en la adición de cascarilla no han recibido amplio uso, a pesar de ser más

livianos que los tradicionales (Bizzotto 1998). De otro lado, para el caso de las puzolanas y materiales abrasivos, el contenido de silicio en la cascarilla es insuficiente (Peña 2001).

En la obtención de aglomerados los obstáculos se encuentran, en razón que el contenido de carbono es bajo (Tabla 1), mientras que materiales como el bagazo de caña que contiene hasta 50,3 % de carbono y sólo el 9,5 % de cenizas (Iñiguez 2003), por tanto se polimerizan con mayor facilidad (Ramón 2007).

TABLA 3. Composición Química del Cemento

COMPONENTE	PORCENTAJE, %
Oxido de Calcio (CaO)	63,0
Oxido de Silicio (SiO ₂)	21,0
Oxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	7,0
Oxido de Férrico (Fe ₂ O ₃)	3,0
Oxido de Magnesio (MgO)	1,5
Oxidos de azufre, sodio y potasio(SO ₃ , Na ₂ O y K ₂ O)	4,5
Total	100,0

Fuente: El cemento. <http://www.puc.cl/quimica/html/sabesquees.html>

En aquellos casos en los cuales que a la cascarilla se le da un tratamiento térmico previo para, a posteriori, darle un uso definitivo, se hace necesario diferenciar dos posibilidades plenamente definidas: el tratamiento térmico anaeróbico y el tratamiento térmico aeróbico.

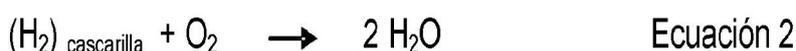
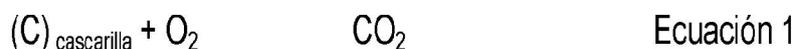
El tratamiento térmico anaeróbico, que se realiza en ausencia de aire, tiene como objeto conservar el esqueleto hidrocarbonado de la cascarilla, de manera que se obtenga un material poroso que, luego de ser sometido al flujo del vapor de agua o al contacto con reactivos químicos, se convierta en el denominado carbón activado que se puede utilizar en diferentes procesos industriales, producción de alimentos, tratamiento de agua e incluso la separación de sustancias tóxicas de la sangre (Mintegui 2003).

El proceso de obtención de carbones activados a partir de cascarilla ha sido estudiado con algún detenimiento (Prada 1986). Los carbones activados

obtenidos a partir de cascarilla de arroz por sus características generales y específicas no son inferiores a los mismos obtenidos de materiales tradicionales (aserrín de pino, huesos, etc.) e incluso superiores a los obtenidos de residuos de la industria azucarera (Castellanos 1984). Sin embargo, la fragilidad física de los carbones de cascarilla hace que con gran facilidad se pulverizan, dificultando su reactivación, condición importante para justificar su producción. Por tanto, se requiere adicionar otros materiales que los hagan consistentes, lo que los encarece y no hace atractiva su obtención (Prada 1986). De todas maneras, este podría ser un importante campo por explorar.

El tratamiento térmico aeróbico, es decir el sometimiento de la cascarilla a la combustión en presencia del aire, es el sustento de la quema a cielo abierto o la prequema controlada, esta última práctica, orientada al uso del producto de la "prequema" en el cultivo de flores. En los dos casos se generan cantidades importantes de dióxido de

carbono – CO₂ que, al desprenderse, contribuye al incremento de la concentración de este gas en el aire, de conformidad con la siguiente ecuación 1:



Con base en esta ecuación 1, se puede deducir que por cada kilogramo de cascarilla se puede

obtener, teóricamente, hasta 1,43 kilogramos de dióxido de carbono. Lo que muestra que la combustión plena de cascarilla es un proceso que aporta cantidades importantes de este gas (el CO₂) a la atmósfera. Esta es la razón central, por la cual se debe prescindir de realizar la combustión de la cascarilla a cielo abierto o la prequemada, puesto que la cascarilla no se encuentra dentro de los materiales generadores de dioxinas (Gorrrachategui 2001), máxime si se garantizan las condiciones para la combustión plena.

La situación es similar, cuando se utiliza la cascarilla como fuente de energía en silos, briquetas, cocinas, etc. (Tardieu 2009), en razón que el propósito es someterla a combustión plena, generando en consecuencia CO₂. Sin embargo, en este caso se tropieza con una dificultad adicional que consiste en que la capacidad calorífica de la cascarilla es muy inferior a la de los materiales combustibles tradicionales (Tabla 4) y no es la más alta entre los materiales de desecho (Tabla 5), situación que hace que no sea ventajoso utilizarla como fuente de energía.

TABLA 4. Capacidad Calorífica de Algunas Sustancias

SUSTANCIA	CAPACIDAD CALORIFICA, Kcal/kg
Alcohol	6.700
Antracita	8.500
Carbón de leña	7.500
Gas natural	11.000
Gasóleo	10.000
Hulla	8.000
Lignito	4.500
Nafta (Gasolina)	11.000
Queroseno	10.500

Fuente: Calorimetría. http://www.hiru.com/es/fisika/fisika_01800.html

TABLA 5. Capacidad Calorífica de Algunos Desechos Vegetales

Tipo de Residuo	CAPACIDAD CALORIFICA, Kcal/kg
Cascarilla de arroz	3.281,6
Bagazo	1.823,4
Palma Africana	3.558,5
Cáscara de café	4.245,8

Fuente: Futuro energético de Costa Rica. Disponible en Internet en: <http://www.tapic.info/arquitectura.medioambiental/chiapas/documentos/energiaslimpias.pdf>

Sin embargo, en la búsqueda de soluciones para la disposición final de la cascarilla, en particular, en lo relacionado con la combustión plena, se han efectuado aportes importantes que permiten abordar el tema, con fines prácticos, con base en elementos consolidados. Entre otros estudios y diseños de prototipos de hornos de combustión de cascarilla realizados en Colombia (Varon 2005), se plantea el diseño en función básica del análisis termodinámico y de transferencia de calor, en el que se parte de un modelo teórico de combustión para caracterizar a la cascarilla de arroz desde el punto de vista químico y térmico, para luego utilizarla como combustible,

involucrando conceptos tales como: balance de masa y balance de energía. En este trabajo se identificaron las condiciones óptimas de combustión (especialmente la relación aire - combustible) y la relación de combustión que conlleve a emitir los contaminantes menos nocivos para el ser humano y, por supuesto, al medio ambiente.

De acuerdo con ese modelo teórico planteado para la combustión de la cascarilla de arroz con las condiciones de su composición elemental y parámetro de humedad, se obtiene la siguiente reacción química:



Ecuación 3

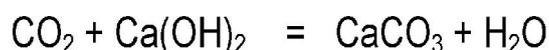
La ecuación 3 muestra que la combustión del carbono, de la cascarilla de arroz, se ajusta a las condiciones teóricas (Ecuación 1), mientras que en el proceso sólo se obtiene el 50 % de agua de la que teóricamente se debiera obtener (Ecuación 2), siempre y cuando se garantice un exceso del 25 % de aire. El nitrógeno pareciera, que en las condiciones del experimento, no sufre ninguna alteración.

El dióxido carbono y el carbonato de calcio

El dióxido o bióxido de carbono – CO₂, es un gas incoloro que se licúa a grandes presiones y bajas

temperaturas. Presenta una solubilidad de 0,145 g. en 100 g de agua. La ingestión puede causar irritación, náuseas, vómitos y hemorragias en el tracto digestivo. La inhalación produce asfixia y la exposición puede ser peligrosa (Wikipedia, 2010). Se incluye dentro del grupo de gases y sustancias que generan el efecto invernadero (Cambio climático global, 2007).

Dentro de las reacciones típicas del dióxido se encuentra la reacción con el hidróxido de calcio, en medio acuoso (Jodakov 1977). En esta reacción se obtiene carbonato de calcio, de conformidad con la siguiente ecuación:



Ecuación 4

Con base en esta ecuación, se puede deducir que es posible obtener carbonato de calcio a partir de materiales que por combustión generen bióxido de carbono como es el caso de la cascarilla de arroz, de manera que el hidróxido actúa como un agente que captura el CO₂ que se genera en la combustión. De igual manera se comportan los hidróxidos de

metales alcalinos de las sales de calcio y de otros metales alcalinotérreos (Jodakov 1977).

En la literatura se encuentran evidencias que fundamentan la posibilidad de obtener carbonato de calcio al contacto de un flujo de dióxido de carbono con óxido de calcio sólido (Oviedo 2009) de conformidad con la siguiente ecuación:



Ecuación 5

El carbonato de calcio – CaCO_3 . Conocido como caliza, presenta baja solubilidad en agua – 0,013 por cada 100 g de agua (Alcarde 1996). Se utiliza en la producción de vidrio y cemento, pero también como correctivo de la acidez de los suelos (Alcarde 1996).

De lo anterior, se hace evidente que las cenizas y el calor que se obtienen de la combustión de la cascarilla de arroz son aprovechados y utilizados en procesos productivos y sólo los gases no han

recibido uso o aplicación, en consecuencia se desechan a la atmósfera, generando problemas de contaminación ambiental, con las ampliamente conocidas consecuencias.

Por tanto, vislumbrar posibilidades de captura y uso de estos gases reviste gran importancia en la actualidad. Este trabajo aporta elementos que podrían servir de soporte para construir soluciones en este campo y aprovechar de manera integral la cascarilla de arroz.

MATERIALES Y METODOS

Localización

Los ensayos de combustión de la cascarilla de arroz se realizaron en la Granja, los análisis - en el laboratorio de análisis de aguas y en el Laboratorio de Suelos de la Universidad de los Llanos, sede Barcelona, ubicada en Villavicencio, Meta, kilómetro 7, vía a Puerto López. La composición química del carbonato de calcio obtenido se determinó en el laboratorio de microscopía electrónica de la Universidad Nacional sede Medellín- UNALMED.

Materiales

Dentro del desarrollo de este proyecto se emplearon todos los elementos necesarios para llevar a cabo la construcción del sistema de combustión, en el cual fueron empleados materiales reciclables como tanques y tubos de chatarrería, adicionalmente se usaron elementos y reactivos propios del análisis de aguas y muestras líquidas de acuerdo con el Standard Methods, así como otros reactivos usados en la captura y posterior precipitación del carbonato de calcio como son Hidróxido de Sodio (NaOH), Hidróxido de potasio (KOH), Hidróxido de Calcio - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -, cloruro de calcio (CaCl_2).

Secado de la cascarilla

Para el secado la cascarilla se extendió en capas delgadas, en un lugar techado y aireado, sobre una superficie plana, cubierta con papel periódico como material adsorbente de la humedad.

Combustión de la cascarilla y captación de dióxido de carbono

Para la combustión, la cascarilla se depositó en la cámara de combustión del horno de diseño propio, de cerca de 30 cm. de diámetro y un metro de alto, compuesto, además, por el espacio, en la parte inferior para la entrada del aire y un tubo metálico (de 2 pulgadas de diámetro), ubicado, en la parte superior para la evacuación de los gases de combustión. Se utilizó en cada ensayo cerca de cuatro kilogramos de cascarilla.

En la cámara de combustión se ubica un vástago de madera que permite que en el centro del bloque de cascarilla, compactada manualmente, se forme un corredor que permita el paso del aire, de abajo hacia arriba, y facilite la combustión. Una vez completo el montaje se inicia la combustión, induciéndola con ACPM en la parte superior y la ventilación desde la parte inferior del horno.

Los gases de combustión se condujeron por el tubo de dos pulgadas, ubicado en la parte superior del horno, al reactor, en que se deposita la solución de 100 gramos de hidróxido de sodio (NaOH) o de hidróxido de Potasio (KOH) disueltos en 10 litros de agua, seleccionados como medio de captura del dióxido de carbono (CO_2). La reacción se controló por medio de la valoración del pH al iniciar y al terminar el proceso de combustión. Para lograr mayor contacto entre los gases de combustión y la solución alcalina, el reactor se conectó,

herméticamente, en la parte superior, a un extractor de gases. La solución producto de esta reacción se traslado al laboratorio para la cuantificación de carbonatos y bicarbonatos presentes y la posterior precipitación del carbonato de calcio.

Obtención de carbonato de calcio

Las muestras del contacto de los gases de combustión de la cascarilla y la solución alcalina, contenidas en el reactor, se someten a pruebas analíticas de carbonatos, bicarbonatos, alcalinidad, dureza cálcica,

dureza total y pH. De igual manera, se determina la cantidad de cloruro de calcio (CaCl_2) que se debe agregar al medio para precipitar el carbonato de calcio, se decanta, filtra al vacío, se seca en estufa $45\text{ }^\circ\text{C}$ durante 24 horas, se pesa la muestra y se recolecta en bolsas el carbonato de calcio (CaCO_3) sólido obtenido. La composición química de este producto se determina en el laboratorio de microscopia electrónica de la Universidad Nacional sede Medellín - UNALMED. El proceso de descomposición térmica de la cascarilla de arroz, la captación del dióxido de carbono y obtención de carbonato de calcio se describen en la Fig. 1.

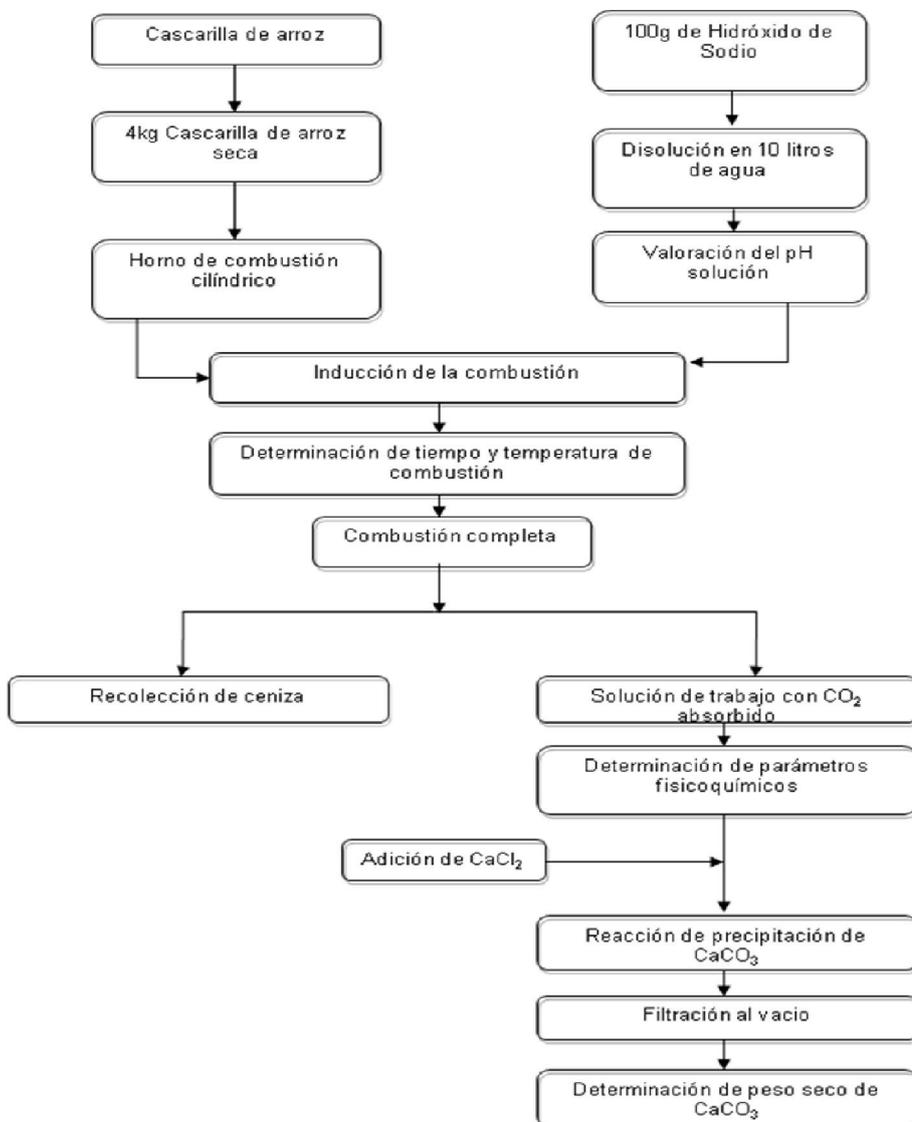


Figura 1. Esquema del proceso de descomposición térmica de la cascarilla de arroz, captación del dióxido de carbono y obtención de carbonato de calcio

TRATAMIENTO ESTADISTICO

Los datos obtenidos de los análisis de laboratorio, se procesaron utilizando los métodos de la estadística descriptiva, por medio de la media verdadera con niveles del 95 % de confianza, con base en la ecuación siguiente (Ajnarova 1978):

$$MV = MC \pm S \frac{T}{\sqrt{N}}$$

Ecuación 6

Donde: **S**- desviación estándar;
MV- media verdadera;
MC- Media calculada (promedio aritmético);
T- Parámetro estadístico;
N- número de ensayos.

Se calculó el error estándar – EE- y el coeficiente de variación –CV- con base en las ecuaciones 7 y 8:

$$EE = S \frac{T}{\sqrt{N}}$$

Ecuación 7

$$CV = \frac{S}{MC} .100;$$

Ecuación 8

Donde:
S- desviación estándar
MC- Media calculada (promedio aritmético);
T- Parámetro estadístico;
N- número de ensayos.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos en los procesos de descomposición térmica, captura de los gases de combustión de la cascarilla de arroz y separación del carbonato de calcio como producto final se exponen en las tablas 6, 7, 8, 9, 10, 11 y la Figura 2. En las tablas se expone el valor de la característica evaluada obtenido en cada ensayo, el promedio, la desviación estándar, el error estándar y el coeficiente de variación, calculados de conformidad con las ecuaciones 6, 7 y 8. El valor procesado se presenta en forma de la media verdadera.

En la Tabla 11 se expone las características de la ceniza de la cascarilla sometida al proceso de combustión con base en los análisis realizados en el Laboratorio de Suelos de la Universidad de los Llanos.

Descomposición térmica de la cascarilla de arroz**Tabla 6.** Valores de la temperatura en el proceso de combustión de la cascarilla de arroz

Ensayo	Temperatura (°C)
1	763
2	782
3	804
4	813
5	758
Promedio	784
Desviación estándar	24
Error estándar	28
Coefficiente de variación, (%)	3,1
Media Verdadera de la Temperatura, °C	784±28

Tabla 7. Porcentaje de humedad de la cascarilla de arroz utilizada en el proceso de combustión

Ensayo	Humedad (%)
1	8,42
2	8,10
3	7,72
4	6,95
5	8,51
Promedio	7,94
Desviación estándar	0,63
Error estándar	0,73
Coefficiente de variación, (%)	7,99
Media Verdadera de la Humedad, %	7,94±0,73

Tabla 8. Tiempo de combustión completa de la cascarilla de arroz

Ensayo	Tiempo (min)
1	74
2	127
3	120
4	96
5	281
Promedio	140
Desviación estándar	82
Error estándar	94
Coefficiente de variación, (%)	58
Media Verdadera del tiempo de combustión, min	140±94

Captura de los gases de combustión de la cascarilla de arroz.

Tabla 9. Valores de pH de la solución de trabajo de NaOH en el proceso de captura de los gases de combustión de la cascarilla de arroz

Ensayo	Valor Inicial del pH	Valor final del pH
1	12,10	8,00
2	12,10	8,20
3	11,90	8,20
4	12,00	8,20
5	12,10	8,90
Promedio	12,04	8,30
Desviación estándar	0,09	0,35
Error estándar	0,10	0,40
Coefficiente de variación, %	0,74	4,17
Media Verdadera del pH, unidades	12,04±0,10	8,30±0,40

Tabla 10. Masa obtenida del carbonato de calcio y porcentaje de rendimiento con relación 100 g de NaOH utilizado

Ensayo	Masa, g	Rendimiento
1	88,50	70,8
2	86,26	69,0
3	84,90	67,9
4	78,00	62,4
5	77,60	62,1
Promedio	83,06	66,4
Desviación estándar	4,97	4,0
Error estándar	5,71	4,6
Coefficiente de variación, (%)	6,0	6,0
Media verdadera	83,04±5,71	66,4±4,6

Productos de captura de los gases y de la combustión de la cascarilla de arroz

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 1.660, 2.142, 2.425 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

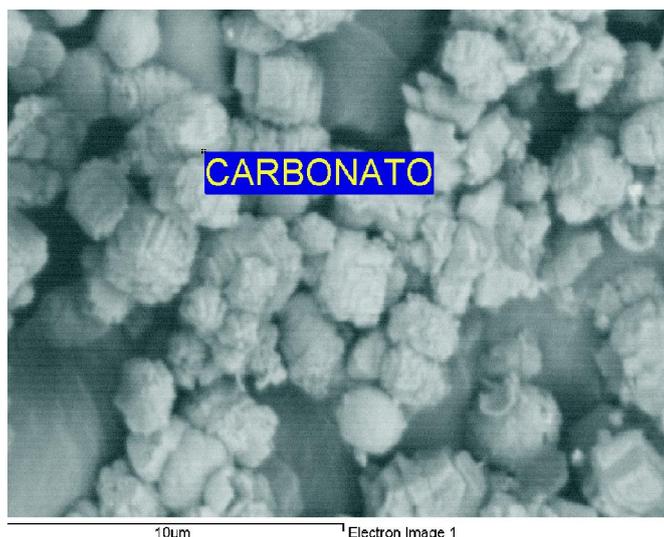
Number of iterations = 2

Standard :

C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM

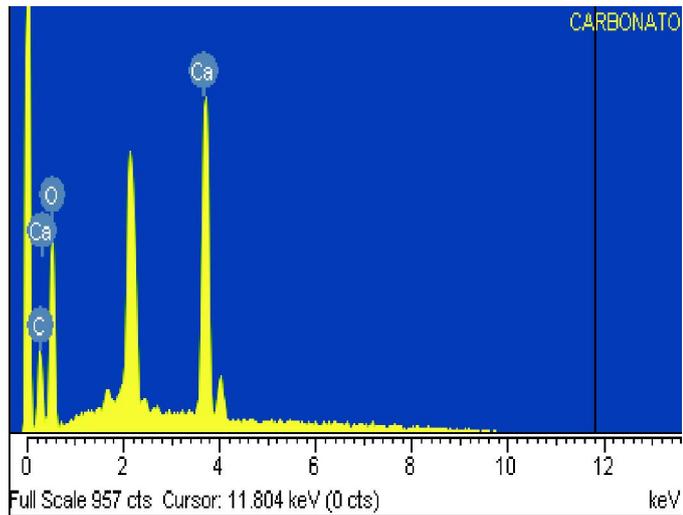
O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM

Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM

**Figura 2.** Resultados del análisis de la composición química del carbonato calcio obtenido por descomposición térmica de la cascarilla de arroz y captura de gases con soluciones alcalinas

Element	Weight%	Atomic%
C K	5.53	11.09
O K	35.53	53.49
Ca K	58.94	35.42
Totals	100.00	

Laboratorio de Microscopía Electrónica.
UNALMED.



Cont. Figura 2. Resultados del análisis de la composición química del carbonato calcio obtenido por descomposición térmica de la cascarilla de arroz y captura de gases con soluciones alcalinas

Tabla 11. Composición química de la ceniza de cascarilla de arroz

Característica	Valor
P (ppm)	426.10
Al (meq/100 g suelo)	0.25
Ca (meq/100 g suelo)	17.20
Mg (meq/100 g suelo)	10.80
K (meq/100 g suelo)	4.15
Na (meq/100 g suelo)	0.52
Cu (ppm)	10.00
Fe (ppm)	10.50
Mn (ppm)	537.50
Zn (ppm)	67.50
B (ppm)	2.77
S (ppm)	175.80

Fuente: Universidad de los Llanos, Laboratorio de suelos; 2009

DISCUSIÓN

El análisis de los resultados obtenidos se adelanta sobre los siguientes aspectos: el proceso de combustión de la cascarilla de arroz; la captura de dióxido de carbono con soluciones alcalinas; la precipitación, el rendimiento y la composición química del carbonato de calcio obtenido y elementos para el aprovechamiento integral de la cascarilla de arroz.

El proceso de combustión de la cascarilla de arroz. Como lo indican diferentes autores (Varon

2005, Tardieu 2009) la combustión de la cascarilla de arroz, en comparación con la de otros residuos vegetales, es un proceso difícil que se sólo realiza en exceso de oxígeno por encima de los valores estequiométricos, condición que se debe garantizar, no sólo con el suministro por un medio mecánico (turbina, ventilador), sino con la adecuación de las instalaciones del horno o quemador por medio de canales, conductos u orificios que faciliten el acceso del aire.

La humedad es otro de los limitantes de la combustión, relacionado, por una parte con la dificultad en el contacto del oxígeno del aire y la cascarilla, pero, además porque el agua, de conformidad con la ecuación 3, es uno de los productos de la combustión, que se genera en proporción inferior a la estequiométrica, por tanto la presencia de agua en la cascarilla inhibe la reacción.

La humedad, de igual manera, tiene relación directa con la temperatura que se logre en el proceso de combustión, a lo que se hacen referencia varios autores (Varon 2005, Valverde 2007). La temperatura alcanzada en el presente trabajo, del orden de 780°C, se logró cuando el porcentaje de humedad de la cascarilla fue inferior al ocho por ciento (Tabla 7), valor no despreciable, máxime, si se tiene en cuenta que puede ser superado al manejar porcentajes más bajos de humedad.

El coeficiente de variación de los datos obtenidos de la humedad y la temperatura lograda en el proceso de combustión de la cascarilla presentan coeficientes de variación (CV) bajos, por el contrario, para los valores del tiempo empleado en el proceso – el coeficiente de variación es alto. Esta última situación puede estar relacionada con el estado del tiempo del día en el que se adelantó la combustión, específicamente la humedad relativa, la que al llegar a valores altos, exige concentraciones más altas de oxígeno en el aire y al no generarlas, el tiempo de combustión es más prolongado.

La captura de dióxido de carbono con soluciones alcalinas. De los carbonatos conocidos, el carbonato de calcio es de los más insolubles en agua (Merck 2007). Por tanto, la captura del dióxido de carbono, principal producto de la combustión de la cascarilla, con hidróxido de calcio en solución (ecuación 4), se presenta como una alternativa importante, en especial porque los líquidos y las soluciones, en general, pueden servir como trampas para la captura de gases, pero además, los gases de combustión presentan características ácidas y,

en consecuencia, debe realizarse una reacción ácido – base, lo que lleva a la precipitación y facilita la separación de la sal obtenida.

Sin embargo, la baja solubilidad del hidróxido de calcio en agua se convierte en obstáculo para utilizarlo como agente que permita la captura de CO₂, en razón que para disponer de las cantidades estequiométricamente necesarias, se requiere volúmenes altos de agua y, por tanto, recipientes de gran tamaño, lo que dificulta la organización del proceso desde el punto de vista técnico.

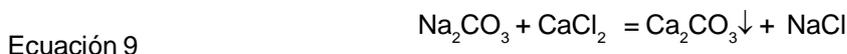
Los demás hidróxidos, de sodio, potasio, presentan mayor solubilidad, lo que permite disponer de considerables cantidades del metal alcalino en solución en recipientes pequeños, lo que hace posible la captura de los gases de combustión.

Por las razones expuestas, además de las consideraciones de costos, en el presente trabajo, la captura de los gases de combustión de la cascarilla se realizó con soluciones de hidróxido de sodio, puesto que no se detectaron diferencias significativas de rendimiento en la obtención de carbonato de calcio, en este proceso, al trabajar con hidróxido de potasio.

El control del proceso de captura de CO₂, de conformidad con los resultados expuestos en la Tabla 9, es una actividad relativamente sencilla, en la que de indicador puede servir el valor del pH de la solución, con valores del orden de 12 unidades al iniciar el proceso y de 8,3 – al concluirlo.

La precipitación, el rendimiento y la composición química del carbonato de calcio obtenido

La precipitación del carbonato de calcio se logra por tratamiento de la solución de carbonato de sodio, obtenido de la captura de dióxido de carbono con la solución alcalina de sodio, con una solución de cloruro de calcio, de conformidad con la siguiente ecuación:



El carbonato de calcio se precipita y el cloruro de sodio se incorpora a la solución acuosa, cuyo volumen se aproxima a los 10 litros de la solución inicial.

Para el cálculo del rendimiento del carbonato de calcio se tuvo en cuenta la masa (100 gramos) de



Ecuación 10

Con base en los datos más recientes sobre la composición química de la cascarilla de arroz (Tabla 1) el porcentaje de carbono es del orden de 14.8%, por tanto, 4 kg de cascarilla utilizados en cada ensayo contienen 592 g de carbono, los cuales, de conformidad con las ecuaciones químicas 1 y 2, deben generar 2.170 g de CO_2 , que a su vez requieren 3.946 g de NaOH (ecuación 10); para producir 3.790 g de CaCO_3 .

Teniendo en cuenta que se utilizaron 100 g de NaOH, estos deben reaccionar con 55 g de CO_2 para generar 133 g de Na_2CO_3 y obtener 125 g de CaCO_3 . Puesto que la masa de carbonato de calcio (CaCO_3) obtenido es en promedio de 83 g, se puede aceptar que el rendimiento del proceso, dentro de estas consideraciones, es del orden del 66.4 %.

Es claro que dentro de estos criterios de evaluación no se tiene en cuenta la totalidad del carbono presente en la muestra de cascarilla utilizada. Sin embargo este análisis se adelantará en investigaciones futuras, puesto que la finalidad del presente trabajo consistía en demostrar la posibilidad de capturar el CO_2 generado en procesos de combustión con soluciones alcalinas, situación que puede considerarse superada.

CONCLUSIONES

La cascarilla de arroz es un residuo vegetal que sólo hace combustión en condiciones de exceso de oxígeno del aire y niveles bajos de humedad del material.

Los gases de combustión de la cascarilla de arroz, entre ellos el dióxido de carbono (CO_2), pueden ser

hidróxido de sodio utilizada en la captura del dióxido de carbono, generado por combustión de la cascarilla, en calidad de reactivo límite, en razón que la masa de cascarilla puede ser considerada en exceso.

Esta afirmación se ve favorecida por los resultados de la composición química del producto obtenido expuestos en la Figura 2.

Elementos para el aprovechamiento integral de la cascarilla de arroz. Los resultados obtenidos en el presente trabajo, que aunque tiene las características de preliminar, permiten considerar posible la captura de los gases de combustión de la cascarilla de arroz, en particular el bióxido de carbono con soluciones de metales alcalinos y su posterior conversión en carbonato de calcio de amplio uso en la producción agrícola.

En estas condiciones, podría plantearse la alternativa de utilizar la descomposición térmica de la cascarilla de arroz como una alternativa de aprovechamiento integral de este abundante residuo de la producción de zonas arroceras. Puesto que el calor que se genera en el proceso puede ser y es aprovechado en procesos agroindustriales y de alimentos que lo requieran, las cenizas y el carbonato de calcio que se obtiene a partir de la captura de los gases de combustión puede aplicarse en cultivos agrícolas y las aguas con contenidos de cloruros – en riego.

capturados con soluciones alcalinas de hidróxido de potasio (KOH) e hidróxido de sodio (NaOH).

El calor generado en el proceso de combustión, por su magnitud, puede ser aprovechado en diferentes procesos productivos.

El reducción del pH de la solución alcalina, al iniciar y concluir el proceso, puede servir de indicador de captura de los gases de combustión.

El producto de la captura de los gases de combustión con soluciones alcalinas puede ser transformado en carbonato de calcio (CaCO_3) por precipitación con soluciones acuosas de cloruro de calcio (CaCl_2).

El producto básico de la captura de los gases de combustión con soluciones alcalinas y su posterior transformación es carbonato de Calcio que puede ser aprovechado con fines agrícolas.

RECOMENDACIONES

Cuantificar el contenido de dióxido de carbono (CO_2) generado durante el proceso de combustión, ya que este gas es un indicador directo del rendimiento en la obtención de carbonato de calcio (CaCO_3) en la captura de los gases de combustión proceso.

Optimizar la captura de dióxido de carbono (CO_2) en el proceso de combustión para lograr mayor

REFERENCIAS

Cortes K. Estudio de la descomposición microbiológica de la cascarilla de arroz. Tesis de pregrado. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Escuela de Ingeniería Agronómica. Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia 1999.

Ajazarova L., Kafarov V. Optimización de experimentos en la ciencia y tecnología químicas. Vyschaya Shkola. Moscú. 1978. 215. En ruso.

Alcarde JC. Rodella AA. O equivalente em carbonato de cálcio dos corretivos da acidez dos solos. *Sci. agric.* [en línea]. 1996 [fecha de acceso 02 mayo 2010]; 53(2-3): 204-210 URL disponible en: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90161996000200002&lng=en&nrm=iso

Bizzotto MB, Natalini MB, Gómez GM. Minihormigones con cascarilla de arroz natural y

La composición química de las cenizas obtenidas durante el proceso de combustión, indica que estas pueden ser de gran utilidad en actividades agrícolas; en especial si se emplean como fuente de elementos de fósforo, manganeso y azufre.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo permiten visualizar la posibilidad de utilizar la descomposición térmica de la cascarilla de arroz como una alternativa para su aprovechamiento integral, en razón que el calor, las cenizas, el carbonato de calcio producto de la captura de los gases de combustión y las aguas efluentes, ricas en cloruros, pueden ser aprovechadas en procesos productivos.

rendimiento en la obtención de carbonato de calcio (CaCO_3) con relación al contenido de carbono en la cascarilla de arroz.

Precisar el tiempo de combustión de la cascarilla como parámetro básico en aplicaciones de la alternativa planteada en mayor escala.

tratada como agregado granular. En Primer Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón; Buenos Aires, junio de 1998. [en línea]. 1999 [fecha de acceso marzo 6 de 2005]. URL disponible en: http://ing.unne.edu.ar/revista/noviembre/arandu_bizzotto.pdf

Castellanos M. Adsorción de sustancias e iones metálicos en aguas residuales empleando carbón activado obtenido de meollo. Tesis de doctorado. Instituto D.I. Mendeleev. Moscú. Rusia. 1984.

Dióxido de carbono. Enciclopedia. Wikipedia en español. [en línea] 2010 [fecha de acceso julio 2009] URL disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Di%C3%B3xido_de_carbono

El Efecto Invernadero, lista resumen sobre gases invernadero. Revista electrónica Cambio Climático

Global [en línea] 1997 [fecha de acceso enero 2010] URL disponible en: Gorrachategui GM. Seguridad alimentaria: dioxinas. XVII Curso de Especialización FEDNA. [en línea] 2001 [fecha de acceso Diciembre 2009] URL disponible en: <http://www.etsia.upm.es/fedna/capitulos/2001CAPVIII.pdf>
<http://www.cambioclimaticoglobal.com/gasesinv.html>

Iñiguez G., Flores S., Martínez L., Utilización de residuos de la industria tequilera. Rev. Int. Contam. Ambient [en línea]. 2003. [fecha de acceso Mayo 2008]; 19(2): 83-91. URL disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/370/37019204.pdf>

Jodakov V. Química inorgánica. Moscú; 1977.

Martínez C, Acevedo G, Espinal G. La cadena del arroz en Colombia. Una mirada global de su estructura y dinámica, 1991-2005. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Observatorio Agro cadenas Colombia. Bogotá, Marzo de 2005. URL disponible en: www.agronet.gov.co/www/docs_agronet/2005112141728_caracterizacion_arroz.pdf

MERCK Reactivos y Productos químicos. Bogotá. Colombia. 2007.

Mintegui RS, Benito FJ, Fernández LA. Uso del carbón activado en las sospechas de intoxicación en urgencias de pediatría. Arch Pediatr Urug [en línea] 2003 [fecha de acceso Junio 2010]; 74(3): 166-175. URL disponible en: http://www.sup.org.uy/Archivos/adp74-3/pdf/adp74-3_6.pdf

Oviedo B, Fanjul G. Una fórmula con patente. La Nueva España. [en línea] 2009 [fecha de acceso enero 2010] URL disponible en: <http://www.lne.es/secciones/noticia.jsp?pNumEjemplar=1524&pldSeccion=38&pldNoticia=484448>.

Peña SC, Zambrano GF. Hormigón Celular con la Utilización de Materiales Locales. Tesis De Grado. Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil

Ecuador 2001 URL disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/3310>

Piñeros Y, Otálvaro A. Evaluación de la producción de etanol a partir de cascarilla de arroz pretratada con NaOCl, mediante hidrólisis y fermentación simultáneas [citado enero 2010] XIII congreso de Biotecnología y Bioingeniería VII Simposio internacional Producción de etanoles y levaduras. (en línea) México 2009. URL disponible: http://www.smbb.com.mx/congresos%20smbb/acapulco09/TRABAJOS/AREA_V/CV-51.pdf

Prada A. Elaboración de métodos para la eliminación de sustancias de hierro y manganeso del agua. Tesis de Doctorado. Instituto D.I. Mendeleyev. Moscú. Rusia 1986.

Ramón V. Inminente industrialización del aglomerado de arroz. Gaceta UNAM [en línea] 2007 [fecha de acceso Septiembre 2009]; 3957: 6. URL disponible en: <http://www.dgcs.unam.mx/gacetaweb/2007/070201/gaceta.pdf>

Tardieu J., De La Torriente A. Aprovechamiento energético de los subproductos del cultivo del arroz. [en línea] 2009 [fecha de acceso Enero 2010] AEPO. Departamento de energía e instalaciones. URL disponible en: <http://www.agroinformacion.com/leer-articulo.aspx?not=219>.

Valverde AG, Sarria B, Monteagudo J. Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz. Scientia et Technica [en línea]. 2007 [citada Septiembre 2009]; XIII (37): 255-260 URL disponible en: <http://www.utp.edu.co/php/revistas/Scientiaettechnica/docsftp/102114255-260.pdf>

Varón CJ. Diseño, construcción y puesta a punto de un prototipo de quemador para la combustión continua y eficiente de la cascarilla de arroz. El Hombre y la Máquina. (en línea) 2005 (fecha de acceso junio 18 de 2007); 25. URL disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/478/47802513.pdf>