

DISPONIBILIDAD DE SiO₂ A PARTIR DE LA QUEMA CONTROLADA DE CÁSCARA DE ARROZ DE MAYABEQUE

Liyen Pérez Quiñones¹, Marietta Llanes Pérez², Yoanni Morales Rodríguez³

¹Ingeniera Civil, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Calle 114, #11901, e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao. La Habana. Cuba. E- mail: liyenperez7@gmail.com

²Ingeniera Civil, Doctora en Ciencias Técnicas, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Calle 114, #11901, e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao. La Habana. Cuba. E- mail: marietta@civil.cujae.edu.cu

³Ingeniero Civil, Empresa de Ingeniería y Proyectos de la Electricidad (INEL), Avenida Salvador Allende, # 666 e/ Oquendo y Soledad, Centro Habana. La Habana. Cuba. E- mail: yoanni@inel.cu

RESUMEN

En las condiciones actuales se incrementa considerablemente la demanda de energía eléctrica, por lo que se buscan alternativas con las cuales se satisfagan estas necesidades de la sociedad sin incrementar la combustión de recursos no renovables. Una de las vías para contrarrestar esta problemática es la utilización de la energía solar fotovoltaica, en mantas de película delgada. Uno de los semiconductores más utilizados en las celdas solares es el silicio, ya sea amorfo o cristalino, el dióxido de silicio (SiO₂) puede obtenerse con relativa facilidad con la quema controlada de la cáscara de arroz. Esta investigación tuvo como objetivo determinar la disponibilidad de SiO₂ a partir de la ceniza de cáscara de arroz procedente de la provincia Mayabeque, para ello se caracterizaron tanto la cáscara como su ceniza, dada la gran importancia que tiene darle solución a este residuo agroindustrial, que trae consigo grandes afectaciones a la salud y al medioambiente, debido a su gran volumen e insatisfactorio almacenamiento. La calcinación de la cáscara se realizó mediante una quema controlada a temperaturas entre los 550- 700°C, hasta un tiempo de 2 horas con intervalos de 30 minutos. La caracterización estructural de la cáscara de arroz y sus cenizas se realizó mediante el método de fluorescencia de rayos X, previo a esto se realizaron ensayos para conocer el contenido de humedad de la cáscara y el peso de la ceniza después de la quema. Se obtuvo más del 85% de SiO₂, dato referido por la literatura consultada.

Palabras claves: arroz, cáscara, ceniza, dióxido de silicio, quema controlada

AVAILABILITY OF SiO₂ FROM THE CONTROLLED BURNING OF MAYABEQUE RICE SHELL

ABSTRACT

Under current conditions, the demand for electrical energy increases considerably, so alternatives are sought to satisfy these needs of society without increasing the combustion of non- renewable resources. One of the ways to counter this problem is with the use of photovoltaic solar energy, in thin film blankets. One of the most widely used semiconductors in solar cells is silicon, whether amorphous or crystalline, silicon dioxide (SiO₂) can be obtained relatively easily with controlled burning of the rice husk. The objective of this research was to determine the availability of SiO₂ from the rice husk ash from the Mayabeque province, for which both the husk and its ash were characterized, given the great importance of giving solution to this agro- industrial waste, which it brings with it great damage to health and the environment, due to its large volume and unsatisfactory storage. The calcination of the shell was carried out by means of the controlled burning at temperatures between 500- 700°C, up to a time of 2 hours with intervals of 30 minutes. The structural characterization of the rice husk and its ashes was carried out using the X- ray fluorescence method, prior to this, tests were carried out to determine the moisture content of the husk and weight of the ash after burning. More than 85% of SiO₂ was obtained, data reported by the consulted literature.

Keywords: ash, controlled burning, husk, rice, silicon dioxide

Nota Editorial: Recibido: diciembre 2020; Aceptado: febrero 2021

1. INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles son recursos no renovables de la naturaleza, por lo que su era está por terminar, debido a que son elementos que se agotarán en el futuro. En ese sentido, las investigaciones emprendidas se orientan hacia el desarrollo de la energía solar [1]. De la energía que llega a la Tierra en forma de radiación de onda corta solo el 45% es absorbido y transformado en forma de calor, el resto es reflejado al espacio. Es

por ello que la energía fotovoltaica se ha convertido en una solución atractiva para cualquier región a nivel mundial; aún más en latitudes cercanas al Ecuador, en donde los niveles de radiación son relativamente constantes durante todo el año [2].

Las investigaciones en la tecnología fotovoltaica se han centrado en la obtención de materiales novedosos basados en silicio (material semiconductor más utilizado en la industria microelectrónica) [3]. Hasta la fecha, la mayoría de celdas y módulos fotovoltaicos que se encuentran en explotación en instalaciones de uso terrestre, emplean el silicio como material semiconductor de base [4]. Estas se pueden fabricar por medio de obleas monocristalinas, policristalinas o películas delgadas amorfas o nanocristalinas [2], que son las que se usan en sistemas de impermeabilización de cubiertas. Las de silicio amorfo han tenido una gran aceptación en la industria microelectrónica debido a su bajo costo, en comparación con el silicio cristalino [5]. El silicio continúa predominando en el mercado fotovoltaico, alcanzando eficiencias hasta del 25% y estabilidad por más de 20 años [6].

Una de las fuentes de silicio es la cáscara de arroz, esta constituye un desecho agroindustrial de difícil degradación natural, y provoca acumulación en las cercanías de los molinos arroceros, lo que trae como consecuencia la proliferación de vectores transmisores de diferentes enfermedades. Además, su gran contenido de sílice compromete la salud de trabajadores y pobladores [7], ante la quema espontánea o no de la misma. La cáscara de arroz no presenta propiedades nutritivas significativas porque tiene un alto contenido de dióxido de silicio (SiO_2), que lo hace imposible de ingerir como alimento, además de contener un bajo contenido de celulosa (40% aproximadamente), presenta un valor nulo por ser desecho y no se le ha dado un uso adecuado. Entre los porcentajes más relevantes de la composición química de la cáscara de arroz se encuentran las cenizas, siendo la sílice la principal composición que no sufre disociación al quemarse, esto hace que se presente una difícil combustión continua y completa [8].

La calcinación de la cáscara de arroz, para obtener una adecuada materia prima, debe realizarse a temperaturas controladas como se hizo en esta investigación teniendo similitud con lo planteado por Charca 2007 [9]. La ceniza de cáscara de arroz (CCA) generada en el proceso de combustión, puede servir como base inicial en la obtención de materia prima con potencialidad en la industria cerámica (para la elaboración de pigmentos o abrasivos), en el área de la construcción (como material puzolánico) o para la elaboración de piezas electrónicas [10]. El principal componente de la CCA generada a moderadas temperaturas de combustión es la sílice amorfa en composiciones comprendidas entre 80 y 97% [11-13]. La composición química de la CCA se determinó por la técnica de fluorescencia de rayos X, al igual que Matthey 2015 [12].

En Cuba este cereal representa alrededor del 8% de la producción agrícola por cultivos seleccionados de la agricultura no cañera, manteniendo su producción por encima de las 345 000 toneladas anuales de arroz [14]. Según datos ofrecidos por especialistas del grupo arroceros del Ministerio de la Agricultura (MINAG), en el país el 92% de la cáscara de arroz no tiene ningún uso, lo que da paso a la presente investigación de determinar la disponibilidad de sílice a partir de las cenizas de cáscara de arroz en la provincia Mayabeque.

2. CARACTERIZACIÓN DE LA PLANTA DE ARROZ

La planta de arroz, científicamente denominada *Oriza sativa* y perteneciente a la familia de las gramíneas, está constituida por cuatro componentes principales: 1) el germen, la parte más rica en nutrientes, ácidos grasos, aminoácidos y enzimas, y que se constituye en la parte germinal que da lugar al crecimiento del grano; 2) el endospermo, que representa alrededor del 70% del volumen del grano y constituye al final del proceso el producto denominado arroz blanco; 3) la cutícula o polvillo, el cual alcanza un 6,8% en volumen en el grano de arroz, utilizado como alimento para animales por su alto contenido de grasas y 4) la cáscara o pajilla, que constituye aproximadamente el 20% en peso del grano y que es separado en el proceso de pilado [15, 16].

3. CARACTERIZACIÓN DE LA CÁSCARA DE ARROZ (CA)

La cáscara de arroz posee una superficie áspera y abrasiva, es muy resistente a la degradación natural por lo que se descompone lentamente y con frecuencia se eliminan mediante incineración o en vertederos, y debido a su bajo contenido de proteínas no es apropiada para el consumo de animales, hechos que dificultan su aprovechamiento económico. Está constituida en más de un 80% de sílice, sus dimensiones varían de 4 – 14mm de largo, 2 – 4mm de ancho y un espesor aproximado de 50 μm debido a la gran variedad que existe de arroz en cáscara.

La forma resultante está en dependencia de su proceso de obtención y del tipo de molino, en los de rodillo neumático se aprietan los granos de arroz y se obtiene casi entera o en forma de barco, sin embargo, en los molinos de rodillo metálico, al apretar los granos de arroz, una gran parte sale partido, y la cáscara obtenida está triturada. Es de importancia aclarar que existen diferencias no sólo físicas entre la cáscara con forma de barco y la triturada, sino que, a la hora de realizar la quema, esta última combustiona mejor y la granulometría obtenida es más fina que la que tiene forma de barco.

La cáscara de arroz puede ser utilizada como combustible, debido a su valor calorífico (aproximadamente 16720kJ/kg), y la ceniza resultante contiene un porcentaje en sílice superior al 90%, lo cual la hace una potencial fuente de este mineral [15]. La misma está formada por el exocarpo, siendo este la superficie abaxial o externa que está constituida por celdas convexas y granos de compuesto de silicio, el mesocarpo como tejido intermedio y el endocarpo como la superficie adaxial o interna. En la Figura 1 se observan las características de cada una de estas zonas mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

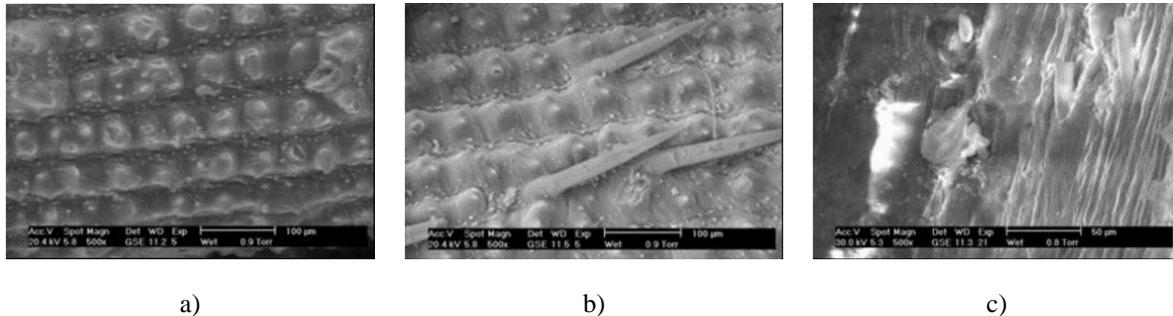


Figura 1: Fotografías obtenidas con MEB de la cáscara de arroz, sin ningún tratamiento, tanto de la parte externa de su superficie (a) y (b) como la interna (c) [16].

3.1. Composición química de la cáscara

La lignina y la celulosa presentes en la cáscara de arroz pueden ser eliminadas por combustión controlada, y en la ceniza queda sólo la sílice, en forma microporosa. Se cree que la sílice en la cáscara de arroz existe en forma opalina (una forma amorfa e hidratada de sílice). Aparentemente la sílice es tomada del suelo y transportada a la planta de arroz como ácido monosilícico, el cual llega a concentrarse en las cáscaras por evaporación y finalmente polimeriza a la forma de membrana sílico-celulosa.

Según la bibliografía consultada es posible afirmar que la composición elemental de una sustancia combustible es su contenido (porcentaje en masa) de carbono (C), hidrógeno (H), azufre (S), oxígeno (O), nitrógeno (N), cloro (Cl) y ceniza, los cuales pueden variar según su procedencia [10, 17, 18].

4. CARACTERIZACIÓN DE LA CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ (CCA)

El proceso de obtención de la CCA es una fuente de energía, puesto que durante la quema el contenido de celulosa y lignina producen un impacto ambiental muy bajo, no obstante, la contaminación se produce al no almacenar o dar un buen uso a la CCA.

Dentro de los componentes de la ceniza de cáscara de arroz se encuentra el SiO_2 , obteniéndose porcentajes de sílice amorfa y cristalina con determinados rangos de temperatura. Las características de la ceniza también dependen del origen del arroz. La ceniza proviene del quemado de la cáscara y del silicio absorbido por la planta solo una parte queda en el grano y la gran mayoría forma la parte estructural de la misma por lo que su ceniza está compuesta principalmente por Óxido de Silicio.

El silicio cristalino está compuesto de silicio en el que la estructura cristalina de la totalidad del sólido es continua, su obtención de la ceniza de cáscara de arroz es a través de quemas a temperaturas superiores a los 750°C y que no sobrepasen los 900°C .

El silicio amorfo presenta coloraciones grisáceas, más activo que la variante cristalina, y se presenta en octaedros de color azul grisáceo y brillo metálico. Se obtiene con temperaturas superiores a los 500°C y que no sobrepasen los 700°C .

Otras prácticas a base de combustiones de cáscara a temperaturas de aproximadamente 850°C durante unas dos horas, muestran la presencia de sílice en una base cristalina de cuarzo. Igualmente muestra que la sílice permanece en estado amorfo cuando las temperaturas permanecen entre 450 y 700°C por un período de 2 a 4 horas. Dado que las formas cristalinas presentan menor reactividad que las amorfas, es esencial que la combustión de la cáscara no supere temperaturas muy elevadas (del orden de 900°C).

Vieira en el 2005 [19] y Charca en el 2007 [9], convergen en que según la temperatura y el tiempo de quema de la cáscara de arroz variarán los porcentajes de cada componente presentes en la ceniza. Además, plantean que las muestras sometidas a menos de 500°C en cortos tiempos de quema presentan un color negro, lo que indica un alto contenido de carbón; sin embargo al aumentar la temperatura y el tiempo aparece una coloración blanca uniforme que indica un bajo contenido de óxidos y un alto contenido de SiO_2 .

5. CARACTERIZACIÓN DEL DIÓXIDO DE SILICIO

El dióxido de silicio (SiO_2) es un compuesto de silicio y oxígeno, llamado comúnmente sílice, es un polvo blanco insoluble en agua, en alcohol y en ácidos, excepto el fluorhídrico, es soluble en soluciones calientes de hidróxidos alcalinos cuyas propiedades físicas se observan en la Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades físicas del dióxido de silicio

Estado de agregación	Sólido
Apariencia	Transparente
Densidad	2,634 g/cm ³
Masa molar	60,0843 g/mol
Punto de fusión	1986 K
Punto de ebullición	2503 K

6. PRODUCCIÓN DE ARROZ EN CUBA

En Cuba la producción de arroz abarca casi todas las provincias, excepto La Habana, Santiago de Cuba y Guantánamo. En el caso de La Habana su consumo es proveniente de distintos países tales como Brasil, Vietnam, China, Guyana y España. Santiago de Cuba y Guantánamo consumen el arroz proveniente de la producción de otras provincias.

La cáscara de arroz constituye aproximadamente el 20% en peso del grano y es separado en el proceso de pilado [20, 21]. El arroz luego de su cosecha se recoge como arroz cáscara húmedo, posteriormente pasa por un proceso de secado, que en Cuba comprende la reducción de humedad de un 25% por peso, quedando un 75% de arroz cáscara seco. El secado se realiza como requisito para un almacenaje seguro, de forma que se inhiba el crecimiento de hongos y bacterias que puedan causar contaminación al arroz. La producción nacional de arroz cáscara húmedo por período, por año y por región se recoge en el "Anuario estadístico de Cuba" [14]. En la Tabla 2 se observa con detalle un desbroce en pérdida de peso desde su recogida en el cultivo hasta el proceso de pilado de la cáscara.

Tabla 2: Producción anual de arroz y cantidad de cáscara [14]

Año	Producción nacional de ACH (ton)	Producción nacional de ACS (ton)	CA (ton)
2012	473 389	355 042	71 008
2013	587 872	440 904	88 181
2014	568 656	426 492	85 298
2015	346 065	259 549	51 910
2016	489 230	366 923	73 385
2017	471 345	353 509	70 702
2018	562 251	421 688	84 338

La producción de arroz de los molinos de occidente se encuentra a cargo de las provincias de Pinar del Río, Artemisa, Mayabeque, Matanzas y Cienfuegos. Suministrándole al país en el 2017 alrededor de unas 173 904 toneladas de arroz cáscara húmeda y posicionando en el primer lugar de producción de arroz a la provincia Pinar del Río con un total de 70 145 toneladas de arroz en ese año [14]. Ver tabla 3.

Tabla 3: Producción anual de arroz en occidente [14]

Año	Producción (ton)									
	Pinar del Río		Artemisa		Mayabeque		Matanzas		Cienfuegos	
	ACH	ACS	ACH	ACS	ACH	ACS	ACH	ACS	ACH	ACS
2012	53 848	40 386	6 323	4 742	15 071	11 303	30 852	23 139	27 608	20 706
2013	71 807	53 855	7 871	5 903	16 560	12 420	43 845	32 884	32 361	24 271
2014	67 413	50 560	8 477	6 358	16 920	12 690	46 387	34 790	29 035	21 776
2015	24 744	18 558	5 656	4 242	14 390	10 793	34 562	25 922	23 276	17 457
2016	46 336	34 752	7 201	5 401	17 395	13 046	45 500	34 125	32 906	24 680
2017	70 145	52 609	7 594	5 696	18 581	13 936	39 704	29 778	37 880	28 410
Total	334 293	250 720	43 122	32 342	98 917	74 188	240 850	180 638	183 066	137 300

6.1. Producción de arroz en Mayabeque

La provincia Mayabeque es la más joven del país, y cuenta con un molino arrocero ubicado en el municipio Güines, a 3km del poblado del mismo, en el batey Osvaldo Sánchez. La Unidad Empresarial Básica (UEB) el Bizarrón, es la encargada de la producción de arroz de este molino, trabajando con una capacidad disponible de 65 toneladas diarias, aportando así unas 14 504 toneladas de arroz cáscara seco en el 2018 con deficiencias debido a problemas mecánicos, eléctricos y de producción de arroz. Además, obtuvo como residuo agroindustrial 2 901 toneladas de cáscara de arroz, provocando condiciones de contaminación para el medio ambiente y afectaciones en el hábitat de los pobladores.

6.2. Porcentaje de cáscara de arroz en Mayabeque

Luego de que el arroz pasa por un proceso de molienda, queda como residuo la cáscara, que equivale aproximadamente a un 20% del peso del arroz cáscara seco, obteniéndose así grandes volúmenes de cáscara; sin lugar donde almacenar, constituye un gran inconveniente para las comunidades. En la Tabla 4 se aprecia el residuo anual de cáscara de arroz en la provincia Mayabeque.

Tabla 4: Producción anual de arroz y cáscara en Güines

Año	Güines		
	Producción (ton)		
	ACH	ACS	CA
2012	15 071	11 303	2 261
2013	16 560	12 420	2 484
2014	16 920	12 690	2 538
2015	14 390	10 793	2 159
2016	17 395	13 046	2 609
2017	18 581	13 936	2 787
Total	98 917	74 188	14 838

7. CARACTERIZACIÓN DE LA CÁSCARA DE ARROZ DEL MOLINO DE GÜINES

Para la caracterización de la cáscara de arroz se realizaron dos ensayos, determinación del contenido de humedad y fluorescencia de rayos X. Con el primero se obtuvo el contenido de humedad de la misma y en el segundo la composición mineralógica.

Un elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia en la combustión, debido a que una gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material, por eso la necesidad de la ejecución de este proceso.

Para una adecuada combustión de la cáscara de arroz se debe controlar un contenido de humedad inferior al 15%, para obtener una combustión balanceada y evitar el exceso de gases contaminantes. A partir de la bibliografía consultada se establece un rango de 8-15% de contenido de humedad en la cáscara de arroz después que esta sale del proceso de descascarillado en un molino. Para la realización de este ensayo se utilizó una muestra de 200g pesada en una pesa digital Sartorius, la muestra se colocó en una bandeja para ser desecada en una estufa ubicada en el laboratorio del Centro de Estudios de Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT) a temperatura de 105^oC a 110^oC durante 24 horas. Luego de extraerse y de enfriarse a temperatura ambiente se determinó su peso seco que fue de 179,4g.

El porcentaje de humedad se calculó de la siguiente forma:

$$\%H = \frac{A - B}{B} * 100 \tag{1}$$

Donde:

%H: Por ciento de humedad de la cáscara de arroz

A: Peso de la cáscara de arroz con humedad ambiental

B: Peso de la cáscara de arroz después de secado en la estufa

De este procedimiento se obtuvo un resultado de 11,5% de humedad.

8. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE QUEMADO DE LA CÁSCARA

Se usó para la quema un horno mufla eléctrico de temperatura máxima de 1000°C, el cual mediante un regulador controla la temperatura que se genera. Es un horno metálico que su interior está formado por un revestimiento refractario, este pertenece al laboratorio del CECAT. La función de la resistencia eléctrica es proporcionar al horno el calor necesario para asegurar su combustión de la forma más uniforme posible.

Para el proceso de quema se seleccionaron muestras de 11g de cáscara de arroz, se colocaron de forma independiente en una bandeja metálica de 16cm de ancho y 20cm de largo, de tal forma que la cáscara quedara lo más dispersa posible en la misma. Se efectuaron quemados a diferentes tiempos y temperaturas.

8.1. Tiempos y temperaturas utilizadas

Se realizó la quema a temperaturas de 550, 600, 650 y 700°C con intervalos de tiempo de 30 minutos hasta llegar a las 2 horas, y así ver el cambio de coloración que se presenta en cada muestra y el posible contenido de SiO₂. En este experimento se quemaron un total de 16 muestras, las que fueron identificadas como se expone en la Tabla 5.

Tabla 5: Identificación de las muestras, temperaturas y tiempos

Identificación de muestras				
Temp. (°C)	Tiempo (h)			
	0,5	1	1,5	2
550	M-0	M-1	M-2	M-3
600	M-4	M-5	M-6	M-7
650	M-8	M-9	M-10	M-11
700	M-12	M-13	M-14	M-15

En la Figura 2 se expone el resultado de la quema, la ubicación de las muestras coincide con las identificaciones que aparecen en la Tabla 5. Se colocaron de forma horizontal las temperaturas y vertical los tiempos, donde se aprecia que a cortos tiempos (30 minutos) la quema de la cáscara de arroz es muy rápida por lo que presenta una apariencia de color negro (carbón) en su totalidad, y alrededor de 1 hora y con el aumento de la temperatura comienza a presentar partículas blancas y grisáceas.



Figura 2: Resultado de la quema de la cáscara de arroz

10. DETERMINACIÓN DEL PORCIENTO DE CENIZA

Para la determinación del porcentaje de ceniza se halló la diferencia de peso entre la cáscara de la muestra y el de la ceniza resultante. Para este ensayo se tomaron muestras de cáscara de arroz de 11g, luego de realizada la quema a las diferentes temperaturas se pesó la ceniza resultante y se determinó el porcentaje que se pierde en cada muestra, Tabla 6, con resultados de 18- 33,4%, en este rango se incluyen desde la muestra M-0 hasta la M-15. Estas variaciones se deben a la diferencia de temperatura y tiempo, mientras menor sea la temperatura y el tiempo, mayor va a ser el contenido que se obtiene de ceniza. Se estableció un rango de 18- 24,54% incluyendo las muestras M-2, M-3, M-6, M-7, M-9, M-10, M-11, M-13, M-14, M-15, ya que son las muestras que presentan mayor cambio de apariencia con respecto al color, siendo las seleccionadas para determinar su composición mineralógica. Se obtuvo como promedio 23,6% de ceniza después de la quema de la cáscara de arroz, lo que demuestra una pérdida de 76,4% del peso inicial de la muestra.

Tabla 6: Peso y porcentaje de ceniza resultante de la quema

Peso y porcentaje de ceniza resultante de la quema								
Temp. (°C)	Tiempo (h)							
	0,5		1		1,5		2	
	Peso (g)	Porcentaje (%)	Peso (g)	Porcentaje (%)	Peso (g)	Porcentaje (%)	Peso (g)	Porcentaje (%)
550	3,70	33,64	2,90	26,36	2,70	24,54	2,50	22,73
600	3,51	31,91	2,40	21,82	2,20	20,00	2,10	19,09
650	3,42	31,09	2,20	20,00	2,10	19,09	2,00	18,18
700	3,20	29,09	2,20	20,00	2,10	19,09	2,10	18,00

10.1. Porcentaje de ceniza con respecto a la cáscara de arroz en Cuba

En Cuba la cáscara de arroz es un residuo agroindustrial del cual solo se utiliza, aproximadamente del 7- 8% de la cáscara que se produce, quedando un 92- 93% inutilizable. Los sectores en los que reside su uso son en la Industria Siderúrgica y el grupo ganadero en camas para naves avícolas, por lo que se estaría desechando una cifra considerable de cáscara de arroz.

Según el análisis anterior, para determinar el porcentaje en peso de la ceniza de la cáscara de arroz, se obtuvo entre 18-24,54% en las muestras seleccionadas representando miles de toneladas anuales, desde el 2012 hasta el 2018 en Cuba según se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7: Estimación del porcentaje de ceniza

Año	CA (ton)	CCA (ton)	
		18%	24,54%
2012	71 008	12 781	17 425
2013	88 181	15 873	21 640
2014	85 298	15 354	20 932
2015	51 910	9 344	12 739
2016	73 385	13 209	18 009
2017	70 702	12 726	17 350
2018	84 338	15 181	20 697
Total	524 822	94 468	128 792

11. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CÁSCARA DE ARROZ Y DE LA CENIZA

El ensayo para determinar la composición mineralógica de la cáscara y de la ceniza de cáscara de arroz se realizó en un laboratorio de la Fábrica de Cemento René Arcay, ubicada a unos 40 kilómetros de la capital cubana y asentada en la Bahía de Mariel, municipio de la provincia Artemisa.

Mediante el proceso de selección visual se separaron las muestras que presentaban carbón en su totalidad, quedando las que empezaban a tener un cambio de coloración hasta llegar completamente a un color blanco o gris. Según lo planteado anteriormente las muestras que se tomaron para determinar su composición mineralógica fueron M-2, M-3, M-6, M-7, M-9, M-10, M-11, M-13, M-14 y M-15. Ver Tabla 8 y Figura 3

Tabla 8: Identificación de las muestras seleccionadas

Identificación de muestras				
Temp. (°C)	Tiempo (h)			
	0,5	1	1,5	2
550	-	-	M-2	M-3
600	-	-	M-6	M-7
650	-	M-9	M-10	M-11
700	-	M-13	M-14	M-15



Figura 3: Muestras de ceniza seleccionadas

11.1. Molienda de las muestras

La molienda de la cáscara de arroz y de la ceniza se realizó en un molino eléctrico de vibración HSM 100, de la marca alemana HERZOG, para posteriormente ser analizadas en un equipo de fluorescencia de rayos X (FRX). Con este equipo se logró triturar las partículas alcanzando la finura necesaria para su posterior estudio. Es importante destacar que cada vez que se realizaba el cambio de muestra se llevaba a cabo una adecuada limpieza del molino para evitar la contaminación de otras muestras.

11.2. Confección de las pastillas

Luego del proceso de molienda se pasó a la fabricación de comprimidos en pastillas, necesitando para esto un mínimo de 10g de cáscara de arroz y de ceniza. Este proceso se realizó en una prensa HTP- 40 de la marca alemana HERZOG, alcanzando fuerzas de prensado de 400 a 600 kN dependiendo del tamaño de la muestra. Las pastillas tienen un diámetro de 40mm, las cuales en su superficie deben quedar lo menos porosas posible. La limpieza final al terminar cada muestra se ejecuta de forma manual eliminando posibles residuos. En la Figura 4 se aprecia el resultado final de este proceso.



Figura 4: Pastilla terminada

11.3. Composición mineralógica de la cáscara de arroz

Para la composición mineralógica cualitativa y cuantitativa de la cáscara de arroz se utilizó un equipo FRX. Este equipo de marca PHILIPS y modelo Cubix con una capacidad de hasta 11 muestras genera un rayo que irradia sobre la pastilla alrededor de 2 a 3 minutos haciendo una lectura de identificación cualitativa y cuantitativa de los componentes presentes en la muestra. En la Tabla 9 se puede apreciar que el mineral que más abunda es el silicio con un 48,4% del peso de la muestra (M-16).

Tabla 9: Composición mineral de la cáscara de arroz

Muestra	Componentes minerales de la CA (%)							
	Si	Al	Fe	Ca	Mg	S	K	Na
M-16	48,40	0,82	1,04	3,96	0,03	0,35	0,19	0,12

11.4. Composición de la ceniza de cáscara de arroz

Se realizó un estudio cualitativo y cuantitativo, para conocer cuáles eran los elementos mayoritarios presentes en las muestras que mostraban cambios de coloración. El análisis se realizó con un equipo FRX.

Para la realización del ensayo se tomaron 10 muestras y se denominaron como se pudo apreciar en la Tabla 9 presentada con anterioridad para analizarlas con mayor orden y control.

A partir de la bibliografía analizada se establece un rango de 85 a 97% de contenido de SiO₂ [9, 10, 12, 15, 20, 21], estos valores se tomaron de acuerdo a la semejanza que tiene el proceso de quema de estas bibliografías con lo realizado en este trabajo.

En la Tabla 10 se observan los resultados obtenidos del ensayo de FRX en el laboratorio, donde las muestras a las que se le realizó el estudio presentan un porcentaje de dióxido de silicio mayor que el 85%. A medida que va aumentando la temperatura y el tiempo de quema se aprecia un aumento del contenido de dióxido de silicio, logrando alcanzar un 91,46% en la muestra M-15, temperatura correspondiente a 700°C y 2 horas de permanencia en el horno.

Tabla 10: Composición mineral de la ceniza de cáscara de arroz

Componentes minerales de la CCA (%)								
Muestra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
M-15	91,46	1,03	0,66	4,04	0,48	0,30	0,28	0,16
M-14	90,72	0,97	0,70	4,78	0,58	0,31	0,29	0,15
M-13	87,96	0,98	0,74	4,68	0,56	0,30	0,31	0,15
M-11	90,69	0,89	0,67	4,34	0,51	0,31	0,29	0,15
M-10	89,43	0,89	0,68	4,29	0,53	0,31	0,30	0,15
M-9	87,65	0,97	0,75	4,16	0,52	0,29	0,28	0,14
M-7	89,98	0,95	0,69	4,32	0,53	0,33	0,29	0,15
M-6	88,78	0,98	0,73	4,48	0,55	0,33	0,29	0,15
M-3	88,59	1,20	0,73	4,38	0,58	0,34	0,28	0,15
M-2	87,15	1,14	0,79	4,67	0,58	0,38	0,28	0,15
Concentración promedio	89,240	1,000	0,714	4,414	0,540	0,320	0,290	0,140
Mín. Concentración	87,150	0,890	0,660	4,040	0,480	0,300	0,280	0,140
Máx. Concentración	91,460	1,140	0,790	4,780	0,580	0,380	0,310	0,160
Muestras usadas	10	10	10	10	10	10	10	10

En la Figura 5 se establece una relación entre el porcentaje de dióxido de silicio, la temperatura y el tiempo de quema en las muestras seleccionadas. Se puede apreciar que con el aumento del tiempo y la temperatura, aumenta también la cantidad de dióxido de silicio presente en la muestra.

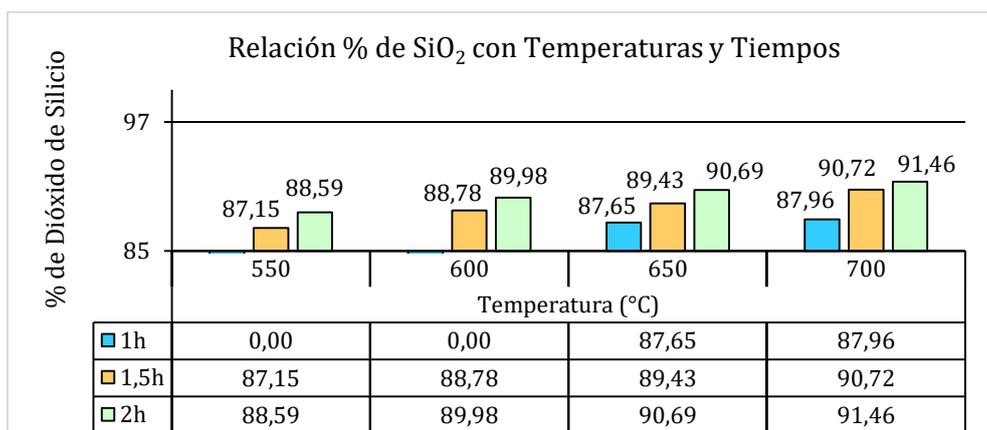


Figura 5: Gráfico de los porcentos de sílice con las temperaturas y tiempos de quema

12. PORCIENTO DE DIÓXIDO DE SILICIO

A partir de los porcentos obtenidos en la investigación, se puede considerar que del molino arrocero de Güines en la provincia Mayabeque, se pudo haber obtenido una cantidad considerable de SiO₂, el cual se pudo emplear como materia prima de la industria. En la Tabla 11 se muestran los resultados estimados.

Tabla 11: Cantidad estimada de sílice

Año	CA(ton)	CCA (ton)		SiO ₂ (ton)	
		18%	24,54%	87,15%	91,46%
2012	71 008	12 781	17 425	11 139	15 937
2013	88 181	15 873	21 640	13 833	19 792
2014	85 298	15 354	20 932	13 381	19 145
2015	51 910	9 344	12 739	8 143	11 651
2016	73 385	13 209	18 009	11 512	16 471
2017	70 702	12 726	17 350	11 091	15 869
2018	84 338	15 181	20 697	13 230	18 929
Total	524 822	94 468	128 792	82 329	117 794

13. CONCLUSIONES

El porcentaje de dióxido de silicio obtenido en los ensayos a la CCA estuvo por encima del 85%, valor que se había propuesto como mínimo a partir de la literatura consultada, estableciéndose los valores del total de las muestras entre 87,15 – 91,46% de contenido de sílice. El mayor porcentaje corresponde a la mayor temperatura y mayor tiempo de quema (700°C en 2h). Generalizando estos resultados se puede estimar la cantidad de sílice que se podría haber obtenido a través de la quema controlada de cáscara de arroz, que hasta hoy, es desechada en los molinos arroceros, arrojando valores totales por encima de las 82 000 toneladas.

14. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de los especialistas del Grupo Arroceros del Ministerio de la Agricultura por facilitar la información requerida para la realización de esta investigación, así como a los especialistas del laboratorio de la Fábrica de Cemento René Arcay, por hacer posible los ensayos de fluorescencia de rayos X.

15. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. G. Prado, "Nuevas tecnologías en el desarrollo de celdas solares," *Perfiles de Ingeniería*, vol. Año XIV, pp. 49- 61, 2018.
- [2] O. F. E. Francisco Javier Eraso, Edison Escobar, "Modelo para la estimación de potencia eléctrica en módulos fotovoltaicos de tecnología basada en silicio," *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 27, pp. 188-196, 2019.
- [3] C. Á.-M. G. S. T. V.-G. E. B.-. Calva, "Efecto de los parámetros de depósito de silicio polimorfo por técnica pecvd sobre las propiedades químicas, nano-estructurales, Optoelectrónicas y de foto-degradación para su implementación en la fabricación de celdas solares," *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 16, pp. 691-1001, 2017.
- [4] D. W. K. Cardenas, "Elaboración de celdas solares de silicio amorfo hidrogenado, para el aprovechamiento de la energía solar," Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Naturales y Formales Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, 2018.
- [5] M. M. M. Ana Carolina Sarmiento Chávez, Alfonso Torres Jacome, Abel García Barrientos, Jairo Plaza Castillo, "Depósito y caracterización de películas dopadas de a-si:h (tipo n o tipo p)," *Revista EIA*, vol. 12, pp. E53-E58, 2016.
- [6] J. A. G. y. E. V. L. Gina Yasmin Soracá Pérez, "Energía renovable: celdas solares de perovskita " *Revista Electrónica Investigación Joven*, vol. 5, pp. 16-19, 2018.
- [7] A. L. Camilo Orrabalís, Roberto Villalba, Ricardo Martínez García, "Cuantificación de la resistencia mecánica de los morteros de cemento al añadir cenizas de cáscara de arroz ricas en nanopartículas de sílice," *Avances en Ciencias e Ingeniería*, vol. 10, 2019.
- [8] B. S. Agustín Valverde, José P. Monteagudo, "Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarrilla de arroz," *Scientia et Technica*, vol. Año XIII, pp. 255- 260, 2007.
- [9] R. G. Gladys Charca, Flora Barba, "Estudio para la obtención de sílice amorfa a partir de la cáscara de arroz," *Acta Microscópica*, vol. 16, p. 212, 2007.

- [10] T. G. P. V. Juan Daniel Martínez Ángel*, Juan Pablo López Zapata, Mariluz Betancur Vélez, "Experimentos de combustión con cascarilla de arroz en lecho fluidizado para la producción de ceniza rica en sílice," *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, pp. 104-111, 2010.
- [11] P. N. P. S. Chandrasekhar, L Praveen, "Effect of organic acid treatment on the properties of rice husk silica," *Journal of Materials Science*, vol. 40, pp. 6535- 6544, 2005.
- [12] R. A. R. Pedro E. Mattey, Jherson E. Díaz, Silvio Delvasto, José Monzó, "Aplicación de ceniza de cascarilla de arroz obtenida de un proceso agro- industrial para la fabricación de bloques en concreto no estructurales " *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 35, pp. 285- 294, 2015.
- [13] V. S. N. Yalçin, "Studies on silica obtained from rice husk," *Ceramics International*, vol. 27, pp. 219-224, 2001.
- [14] (2012, 2013, 2014, 2015, 2016 y 2017). *Anuario estadístico de Cuba*.
- [15] J. E. R.-P. L.M. Ahumada, "Uso del SiO₂ obtenido de la cascarilla de arroz en la síntesis de silicatos de calcio," *Revista Académica Colombiana de Ciencias*, vol. 30, pp. 581-594, 2006.
- [16] C. M. P. Andrea Arcos, Diego; Rodríguez Páez, Jorge Enrique, "La cascarilla de arroz como fuente de SiO₂," *Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia*, pp. 7-20, 2007.
- [17] N. E. V. L. Cesar A. Andrade-Tacca, Carlos F. Medina-Caceres, "Análisis de dureza y resistencia a la tracción de un compuesto de matriz metálica Al-SiO₂, utilizando latas de aluminio y cáscara de arroz como materia prima " *Revista Boliviana de Química*, vol. 36, pp. 60- 72, 2019.
- [18] I. G. a. V. R. B. Treviño, "Obtención y caracterización de carburo y nitruro de silicio a partir de la cascarilla de arroz," *Ingenierías*, vol. VI, pp. 21-27, 2003.
- [19] M. E. M. G. Flávio de Lima Vieira; Alfredo Santos Liduário; Álvaro Donizete Lopes; Rubens Machado Bittencourt, "Comparativo da determinacao do teor de amorfismo da cinza de casca de arroz (CCA) a través de Difracao de Raios- X e Método Químico " in *47 Congresso Brasileiro do Concreto*, Recife, Brasil, 2005, vol. Inovações Tecnológicas para o Concreto, pp. 372- 381.
- [20] L. A. M. A. Forero, S. Díaz, "Obtención de silicio metalúrgico a partir de mezclas de ceniza de cascarilla de arroz y arena silicea " in *X Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales IBEROMET*, Cartagena de Indias (Colombia), 2008
- [21] F. C. Lanning, "Silicon in rice," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 11, pp. 435- 437, 1963.