

# AHORRO DE COMBUSTIBLE Y ENERGÍA EN HORNOS USADOS PARA LA ELABORACIÓN DE PANELA MODIFICANDO EL DISEÑO DE PAILAS ABIERTAS

Oscar Andrés Mendieta Menjura<sup>1</sup>, Jorge Luis Nieves Tayo<sup>2</sup>, Eidy Rocio Valero Melo<sup>3</sup>, Arlex Chaves Guerrero<sup>4</sup>, Hugo Reinel García Bernal<sup>5</sup>.

## RESUMEN

En el presente estudio se evaluó la eficiencia de pailas en hornos para la elaboración de panela. Se modificó la geometría del área de transferencia de energía térmica de las pailas para evaluar dicha eficiencia. El fondo de las pailas abiertas (típicamente plano) se cambió por una con forma geométrica similar a canales paralelos con diferentes secciones transversales dispuestos en la dirección del movimiento de los gases de combustión. La eficiencia del horno fue determinada para diferentes posiciones y alturas de las nuevas pailas en el horno. Los resultados demostraron que los nuevos diseños de las pailas mejoraron la transferencia de energía, principalmente la geometría con sección transversal triangular cuando la altura entre el piso del ducto y el fondo de la paila fue de 8cm. Se observó una mejora considerable de la eficiencia de utilización de la energía térmica, lo cual resulta en un ahorro del 28,48% de combustible.

**Palabras claves:** ahorro de energía, horno para la elaboración de panela, transferencia de calor, pailas abiertas, canales.

## ABSTRACT

This study evaluated the efficiency of pans in furnaces to jaggery making. It was modified the geometry of thermal energy's transfer area of pans to asses such efficiency. The background of open pans (typically flat) was changed for a geometry similar to parallel channels with different cross sections arranged in the direction of movement of the combustion gases. The furnace efficiency was determined for different positions and heights of new pans in the oven. The results showed that new design improved energy transfer, especially geometry with triangular cross section where the height between the floor of the duct and the bottom of the pan was 8cm. There was a significant improvement in the efficiency of utilization of thermal energy, resulting in a saving of 28.48% of fuel.

**Key words:** energy saving, jaggery making furnace, heat transfer, boiling open pans.

<sup>1</sup> Ingeniero Químico, MSc. en Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia. E-mail: andrewmand@gmail.com.

<sup>2</sup> Ingeniero Químico. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia.

<sup>3</sup> Ingeniero Químico. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia.

<sup>4</sup> Ph.D. en Ingeniería Química. Profesor Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia.

<sup>5</sup> MSc. en Ingeniería Agrícola. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, CORPOICA. Km 14 Vía Mosquera. Colombia.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente la caña de azúcar se cultiva en más de 100 países, ocupando alrededor de 23,7 millones de hectáreas en el mundo, para una producción de 1.683 millones de toneladas de caña por año (FAOSTAT, 2011). En Colombia el cultivo de caña de azúcar se destaca por ocupar el segundo lugar en extensión después del café; el cultivo se extiende por 180.000 Ha, con un rendimiento de 12,0 toneladas por hectárea, produciendo anualmente 2,4 millones de toneladas de caña de azúcar, de las cuales se destina alrededor del 50% para la elaboración de panela (AGRONET, 2011).

La caña de azúcar es utilizada para hacer edulcorantes como el azúcar y la panela, siendo la evaporación del agua de los jugos de caña la operación unitaria más importante en el proceso de elaboración de ambos productos. No obstante, el azúcar es producido en fábricas bien equipadas en las cuales la evaporación se lleva a cabo de una manera eficiente por medio de evaporadores múltiple efecto, a presión y temperatura baja, lo que reduce el riesgo de afectar térmicamente el producto. Por otra parte, la panela es fabricada en pequeñas unidades descentralizadas ubicadas principalmente en zonas rurales. Debido a limitaciones tecnológicas de estas unidades, la evaporación se realiza en hornos con pailas abiertas donde se lleva a cabo el calentamiento y ebullición/concentración de los jugos de caña de azúcar. A diferencia del mismo proceso de ebullición/concentración en la industria azucarera, en la industria panelera esta operación unitaria es caracterizada por el bajo aprovechamiento de la energía térmica lo que conlleva a una baja eficiencia energética del proceso.

El horno u hornilla panelera (Figura 1) está compuesto de una cámara de combustión, un tren de pailas que

se constituye en la zona de transferencia de calor, un ducto de gases y una chimenea. El horno es la unidad de operación donde se transforma la energía del bagazo en energía térmica que posteriormente se aprovecha para desarrollar las etapas del proceso: precalentamiento, clarificación, evaporación y concentración; siendo la etapa de evaporación la que consume la mayor cantidad de energía suministrada al horno.

Típicamente, el bagazo de la caña de azúcar obtenido durante el proceso de trituración de la caña/extracción de los jugos es utilizado como combustible primario en los hornos de fabricación de panela. La composición promedio del bagazo de caña de azúcar, según Manohar (1977), es: 50% p/p de humedad, 47% p/p de fibra, 2,5% p/p de azúcar y 0,5 p/p de minerales; para esta composición el valor calorífico neto es de 7.866,7 kJ/kg (SUGARTECH, 2011). El bagazo es secado antes de utilizarlo como combustible en zonas llamadas bagaceras, en donde alcanza una humedad cercana al 30% p/p, aumentando su valor calorífico neto hasta 12.018,7 kJ/kg.

El ahorro de bagazo podría dar lugar a una nueva forma de generación de ingresos extra a la fabricación de panela. El bagazo se pudiera aprovechar como materia prima en la industria del papel y la celulosa, para lo cual las fibras de la corteza de la caña de azúcar son un excelente recurso; como alimento para animales, utilizando la porción de médula de la caña; o como carbón por su compactación y posterior transformación. Sin embargo, el déficit de combustible es común en los hornos para la elaboración de panela debido a la baja eficiencia de utilización de la energía térmica, lo cual hace que se incremente el tiempo de procesamiento de los jugos y se disminuya la calidad del producto y la productividad (P.V.K. Jagannadha, 2009).

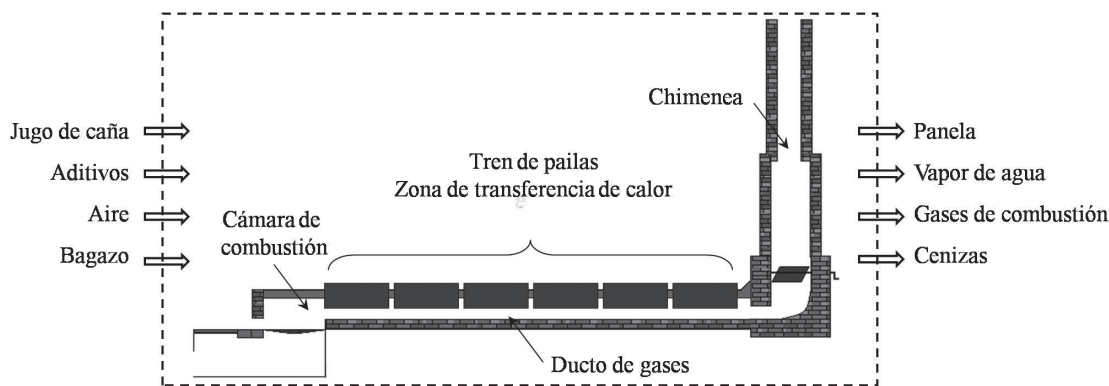


Figura 1. Partes de una hornilla panelera.

Instituciones como la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA), y su Centro de Investigación para el Mejoramiento de la Agroindustria Panelera (CIMPA), han dedicado más de 20 años a investigaciones relacionadas con avances tecnológicos para el sector panelero. En estas dos décadas se ha mejorado el diseño de los hornos tanto en la zona de combustión como en la de transferencia de calor. En este último se han realizado estudios que permiten aprovechar en mayor proporción la energía generada en el horno a través de diseños modificados de las pailas (García, 2007). Como resultado de estos estudios, CORPOICA reporta un aumento de la eficiencia global (dada como el producto de la eficiencia de combustión por la de transferencia de calor) de 32,5% en hornos tradicionales a 37,5% en hornos con pailas aleteadas y 42,6% en hornos con pailas pirotubulares (García, 2010).

Anwar (2010) llevó a cabo pruebas de evaporación de agua en un horno de dos pailas con y sin aletas en el lado de los gases de calentamiento. Su estudio reporta un aumento en la eficiencia de utilización de la energía térmica del 20% a alrededor del 29% con la inclusión de las aletas; el uso de aletas en las pailas permitió la ruptura de una capa aislante formada por los productos de combustión y el aire, y proporcionó un área metálica adicional para la transferencia de calor.

Z.M. Omara (2011) estudió experimentalmente la mejora de la productividad de destiladores solares mediante el aumento de la superficie de absorción. Tres destiladores fueron diseñados y fabricados: uno convencional, uno con aletas y uno con canales. Los resultados indicaron que la productividad de los destiladores solares fue mayor que el convencional, aumentando la cantidad de agua destilada producida en 40% para los aleteados y en 21% para el de superficie ondulada.

La modificación de la superficie de transferencia de calor no es un concepto nuevo, bien sea utilizando aletas u otro diseño, sin embargo, en los evaporadores utilizados en los hornos para la elaboración de panela aún se encuentra en etapa de exploración, y por tanto surge la necesidad de realizar estudios que permitan el mejoramiento del proceso.

## CONFIGURACIÓN DE LAS PRUEBAS Y PROCEDIMIENTO

Para la realización del estudio se construyeron pailas con fondo modificado en canales configurados

longitudinalmente en la dirección del movimiento de los gases de combustión. Los criterios de selección de las geometrías de los canales fueron: incremento del área de transferencia de calor, construcción y limpieza. Se seleccionaron tres geometrías para las pruebas: triangular, circular y trapezoidal, las cuales obtuvieron las mejores valoraciones respecto a los criterios de selección. Los perfiles y las dimensiones de las pailas acanaladas se muestran en la Tabla 1; cada una de ellas se construyó con una longitud de 1 m. El número de canales en los fondos de las pailas dependió de la geometría y del ancho del ducto de gases del horno; así, la geometría triangular presentó cuatro canales, mientras que las geometrías trapezoidal y circular tres. En la Tabla 1 se muestra también el efecto de los canales sobre el área de transferencia de calor respecto a pailas convencionales de fondo plano con dimensiones similares de ancho y largo, que presentan un área promedio de 11.523 cm<sup>2</sup>.

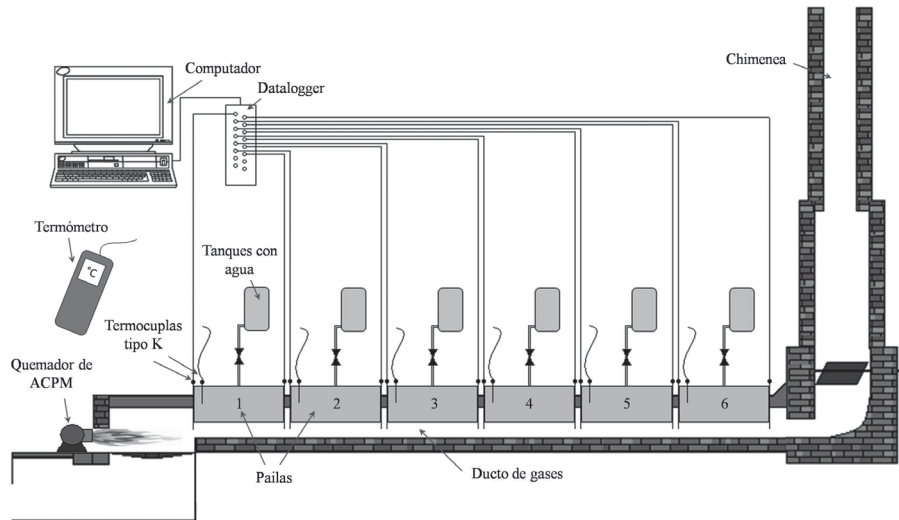
Las pruebas se realizaron en un horno plano ubicado en las instalaciones del CIMPA (Figura 2). Las pailas se construyeron en acero galvanizado calibre 16. Se hicieron dos pailas de cada geometría para ocupar los seis espacios del horno a lo largo del ducto de gases. Se realizaron pruebas con tres arreglos, es decir, tres combinaciones de las geometrías de las pailas; cada arreglo se ensayó a alturas de 8 y 15 cm medidas desde el nivel del ducto al fondo de la paila, tal como se indica en la Figura 3 para la geometría triangular. El rendimiento del horno fue evaluado con las pailas modificadas para el calentamiento/ ebullición de agua como se menciona a continuación:

Para las pruebas de calentamiento/ebullición, las pailas se llenaban inicialmente con agua hasta un nivel específico. Cada paila tenía un suministro de agua proveniente de tanques externos calibrados con una precisión de 0,1 L; los tanques eran cargados con agua y conectados a las pailas a través de tubería de ½ in (1,27 cm). Durante cada prueba, mientras ocurría la evaporación, se suministraba agua de los tanques a las pailas a través de válvulas de paso con el propósito de mantener constantes los niveles de líquido en los evaporadores. Al finalizar la prueba, se detenía el suministro de energía a la hornilla permitiendo que el agua alcanzara la temperatura ambiente en los evaporadores y fuera posible nivelar con exactitud su altura en las pailas. El descenso del nivel en los tanques externos permitió medir la cantidad de agua evaporada de cada paila. La temperatura inicial y final del agua en cada paila se midió con un termómetro TESTO 735 y termopares tipo K (Chromel Alumel) con capacidad de hasta 1.500 °C.

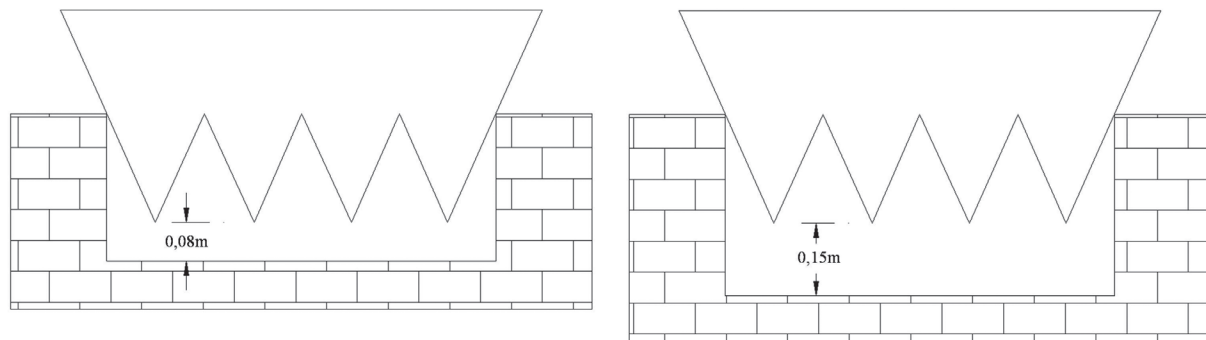
**Tabla 1.** Perfiles de las geometrías de los canales y su efecto sobre el área de transferencia de calor.

Geometría de las pailas acanaladas			
Triangular	Circular	Trapezoidal	
Área modificada (cm <sup>2</sup> )	19.730	Área modificada (cm <sup>2</sup> )	20.202
Aumento del área* (%)	71	Aumento del área* (%)	75
Número de Canales	4	Número de Canales	3

\* Aumento en el área de transferencia de calor de las pailas modificadas respecto a las convencionales planas.



**Figura 2.** Esquema general de los componentes del horno plano, la ubicación de las pailas acanaladas y los elementos utilizados en las pruebas.



**Figura 3.** Altura del piso del ducto al fondo de la paila.

Teniendo en cuenta que el objetivo de la investigación fue estudiar la eficiencia de transferencia de calor en las pailas modificadas, independiente de la fuente de energía, se prefirió hacer el suministro de energía al horno por medio de un quemador de ACPM, logrando trabajar con un flujo constante de energía a las pailas sin variaciones significativas. El quemador entregó al horno una potencia de 500 kW y la duración de cada prueba fue de 60 min. Las temperaturas de los gases de combustión se midieron en el ducto cada 30 segundos, al inicio y final de cada paila, con termopares tipo K (Chromel Alumel) ubicadas verticalmente (Figura 2). Los datos de las temperaturas fueron registrados en un *datalogger multiplexor* con 16 entradas análogas, que los reportaba a un computador donde se procesaba la información con el software *MicroScan V.5*.

Con base en la cantidad de agua inicial en cada paila, el agua evaporada, la temperatura inicial y final del agua y la potencia suministrada por el quemador de ACPM, se calculó la eficiencia de utilización de la energía térmica ( $\eta_{EUT}$ ) con la ecuación 1:

$$\eta_{EUT} = \frac{Q_{apr}}{Q_{sum}} \times 100 \quad (1)$$

Los valores de  $Q_{apr}$  y  $Q_{sum}$  están dados por las siguientes expresiones:

$$Q_{apr} = m_{H_2O,i} C_{p_{H_2O}} (T_f - T_i) + m_{ev} \lambda \quad (2)$$

$$Q_{sum} = 3600 \times P_{ACPM} \quad (3)$$

Donde:

$Q_{apr}$ : Energía térmica aprovechada, kJ.

$Q_{sum}$ : Energía térmica suministrada, kJ.

$m_{H_2O,i}$ : Masa de agua inicial, kg.

$C_{p_{H_2O}}$ : Capacidad calorífica del agua, kJ/kg °C.

$T_f$ : Temperatura final del agua, °C.

$T_i$ : Temperatura inicial del agua, °C.

$m_{ev}$ : Masa de agua evaporada, kg.

$\lambda$ : Calor latente de evaporación del agua, kJ/kg.

$P_{ACPM}$ : Potencia suministrada por el ACPM, kW.

Las pruebas fueron replicadas tres veces y se calcularon los valores promedio.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

Los resultados promedio de los arreglos estudiados se resumen en la tabla 2 y 3, para las alturas de 8 y 15 cm respectivamente. De las tablas se observa que la  $\eta_{EUT}$  de los arreglos a una altura de 8 cm fue mayor que a 15 cm; el incremento corresponde al 25,5% en promedio entre los arreglos (Figura 4).

Los perfiles de temperatura de los gases de combustión en el ducto de la hornilla se muestran en la Figura 5. En el caso de los arreglos a 8 cm de altura se obtuvo una disminución más rápida de la temperatura que para los de 15 cm. Para comprobar esto se calculó la pendiente promedio de las líneas de tendencia lineal de los perfiles de temperatura, encontrando un incremento del cambio de la temperatura respecto a la posición en la hornilla de 66,4% al pasar de la altura de 8 cm a la de 15 cm, lo cual sugiere que ocurre una mayor transferencia de energía al disminuir el área del ducto y por tanto un incremento en la eficiencia de utilización de la energía térmica.

**Tabla 2.** Resultados de las pruebas en las pailas acanaladas a una altura de 8 cm.

Arreglo	Posición	Geometría	$T_{H_2O,i}$ (°C)	$T_{H_2O,f}$ (°C)	$m_{H_2O,i}$ (kg)	$m_{H_2O,ev}$ (kg)	$T_{gas,i}$ (°C)	$T_{gas,f}$ (°C)	$Q_{apr}$ (kW)	$m_{H_2O}^{*Tev}$ (kg)	$\eta_{EUT}$ (%)
1	1	Triangular	22,3	94,3	173,5	89,3	503,3	434,3	71,3	203,2	41,7
	2	Trapezoidal	22,3	94,4	165,2	43,3	434,3	424,3	41,4		
	3	Circular	22,0	94,0	169,9	25,3	424,3	300,7	30,3		
	4	Triangular	23,0	91,9	173,5	21,0	300,7	269,0	27,2		
	5	Trapezoidal	23,0	86,8	165,2	14,0	269,0	261,0	21,2		
	6	Circular	22,3	75,4	169,9	10,3	261,0	225,0	17,0		

2	1	Trapezoidal	22,3	94,4	165,2	67,3	462,7	396,0	56,7	176,9	38,8
	2	Circular	22,3	94,1	169,9	32,7	396,0	376,0	34,9		
	3	Triangular	22,0	93,9	173,5	26,3	376,0	340,7	31,2		
	4	Trapezoidal	23,3	93,4	165,2	23,0	340,7	263,0	28,1		
	5	Circular	22,7	85,9	169,9	14,3	263,0	243,3	21,6		
	6	Triangular	22,3	86,3	173,5	13,3	243,3	241,3	21,4		
3	1	Circular	23,0	94,2	169,9	74,7	490,0	425,7	61,6	186,7	39,5
	2	Triangular	23,3	94,1	173,5	45,0	425,7	392,7	42,9		
	3	Trapezoidal	23,3	94,0	165,2	26,0	392,3	328,3	30,1		
	4	Circular	23,0	87,1	169,9	15,3	327,7	262,0	22,4		
	5	Triangular	23,3	88,8	173,5	14,7	262,0	228,0	22,5		
	6	Trapezoidal	22,0	79,2	165,2	11,0	228,0	188,3	18,0		

$m_{H_2O,TeV}$ : Masa de agua total evaporada, kg;  $T_{gas,f}$ : Temperatura final de los gases de combustión, °C;  
 $T_{gas,i}$ : Temperatura inicial de los gases de combustión, °C

**Tabla 3.** Resultados de las pruebas en las pailas acanaladas a una altura de 15 cm.

Arreglo	Posición	Geometría	$T_{H_2O,i}$ (°C)	$T_{H_2O,f}$ (°C)	$m_{H_2O,i}$ (kg)	$m_{H_2O,ev}$ (kg)	$T_{gas,i}$ (°C)	$T_{gas,f}$ (°C)	$Q_{apR}$ (kW)	$m_{H_2O,TeV}$ (kg)	$\eta_{EUT}$ (%)
1	1	Triangular	22,3	93,8	173,5	44,0	429,7	390,0	42,4	113,4	28,7
	2	Trapezoidal	22,0	91,4	165,2	22,7	390,3	346,7	27,7		
	3	Circular	22,3	79,3	169,9	12,0	347,7	334,3	18,9		
	4	Triangular	22,7	83,0	173,5	13,3	334,0	300,3	20,6		
	5	Trapezoidal	22,7	77,3	165,2	12,7	300,3	275,3	18,5		
	6	Circular	23,0	72,0	169,9	8,7	275,3	258,0	15,2		
2	1	Trapezoidal	22,7	94,6	165,2	51,3	414,0	357,3	46,5	136,9	32,8
	2	Circular	22,0	93,5	169,9	24,0	357,3	300,0	29,4		
	3	Triangular	23,3	91,5	173,5	19,3	300,0	299,0	26,0		
	4	Trapezoidal	22,3	85,8	165,2	16,0	299,3	267,3	22,4		
	5	Circular	23,0	79,7	169,9	11,0	267,3	264,0	18,2		
	6	Triangular	22,7	81,7	173,5	15,3	264,3	223,3	21,7		
3	1	Circular	22,0	94,1	169,9	62,7	418,3	376,3	54,1	152,0	34,9
	2	Triangular	22,0	94,0	173,5	32,0	376,3	323,3	34,9		
	3	Trapezoidal	21,7	90,9	165,2	19,3	323,3	295,3	25,6		
	4	Circular	22,3	83,9	169,9	14,3	295,3	285,7	21,3		
	5	Triangular	22,3	83,3	173,5	12,0	285,7	272,3	19,9		
	6	Trapezoidal	22,3	82,3	165,2	11,7	272,3	256,7	18,9		

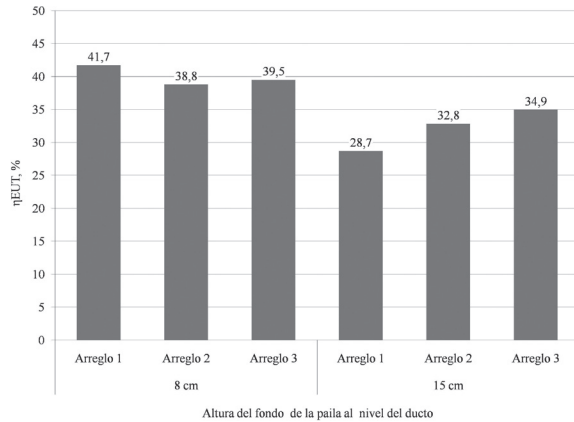


Figura 4. Efecto de la altura del nivel del ducto al fondo de la paila sobre  $\eta_{EUT}$ .

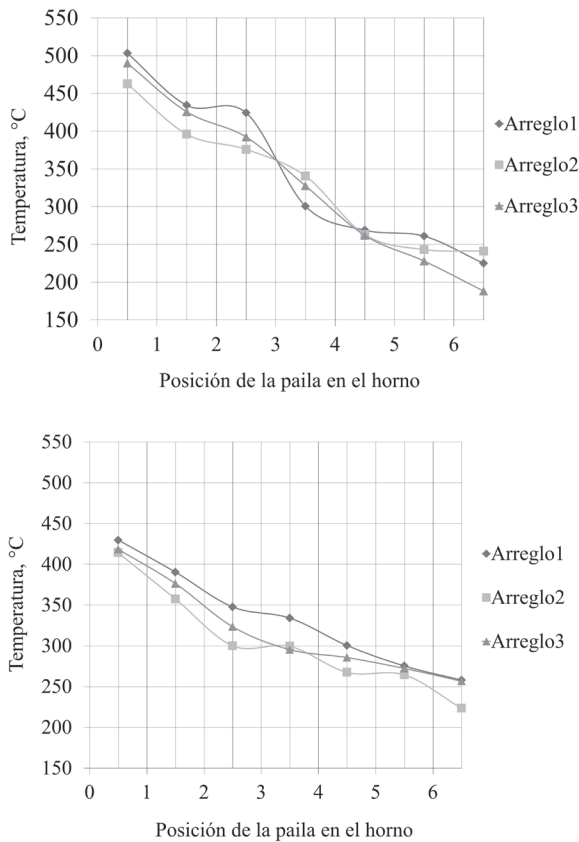


Figura 5. Perfiles de temperatura de los gases de combustión en el ducto de la hornilla. Izquierda: altura de 8 cm; derecha: altura de 15 cm.

Por otro lado, con el fin de determinar el posible ahorro de bagazo debido al cambio de la altura del piso del ducto al fondo de las pailas acanaladas, se convirtió la potencia suministrada por el ACPM a kilogramos

de bagazo con una humedad del 30%, utilizando el respectivo valor calorífico neto. De este ejercicio se encontró que la cantidad de bagazo que se hubiera suministrado para realizar las pruebas anteriores habría sido 150 kg/h. En la Figura 6 se muestra la relación kilogramo de agua evaporada por kilogramo de bagazo en función de las alturas y arreglos estudiados. Se encontraron los mayores valores de la relación cuando la altura fue de 8 cm, logrando alrededor del 43,81% más de agua evaporada (0,37 kilogramos de agua evaporada por kilogramo de bagazo en promedio respecto a la altura de 15 cm).

El efecto de las pailas acanaladas sobre el consumo de bagazo se muestra en la Figura 7. Se encontró que al cambiar la altura de 15 a 8 cm, resulta una reducción de 0,34 kilogramos de bagazo por kilogramo de agua evaporada, lo cual corresponde a un ahorro de combustible y energía del 28,48%. En consecuencia al ahorro de bagazo, habría una reducción de las emisiones indeseables de CO y CO<sub>2</sub>.

Se analizaron las geometrías seleccionadas en el estudio para el caso de la altura de 8 cm del nivel del ducto a los fondos de las pailas, para lo cual se calculó la relación entre la energía térmica aprovechada por cada paila entre la del arreglo correspondiente. Se observó que la geometría triangular presentó la mayor capacidad para aprovechar la energía, tal como lo muestra la Figura 8 en las diferentes posiciones de la hornilla. Comparando las geometrías se observa que la triangular obtuvo un incremento promedio del 15,58% respecto a la circular, mientras que respecto a la trapezoidal fue del 9,32%; por tanto utilizar pailas acanaladas con geometría triangular y a una altura de 8 cm daría lugar a un mejoramiento del proceso.

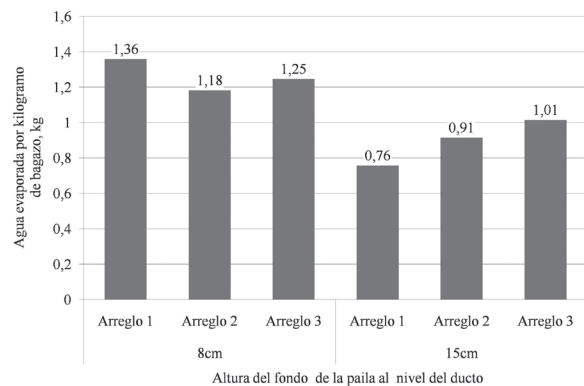
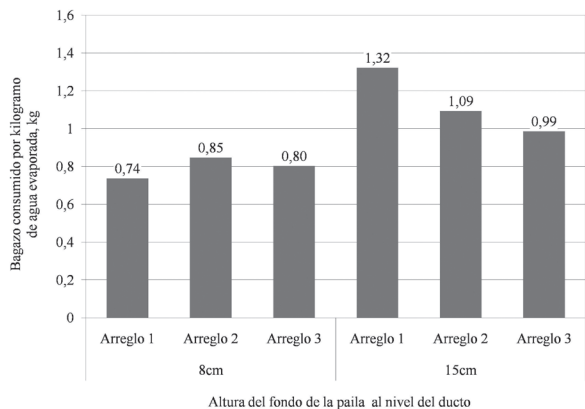
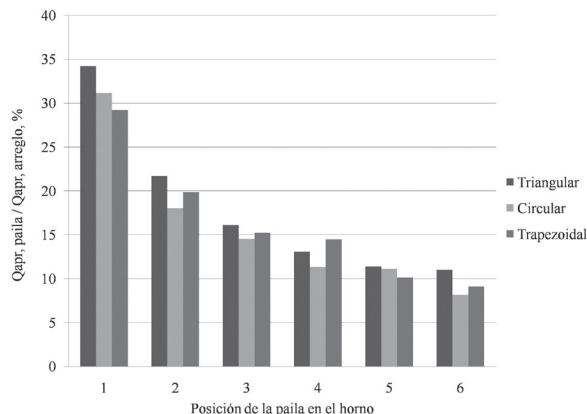


Figura 6. Efecto de la altura del nivel del ducto al fondo de la paila sobre la evaporación de agua.



**Figura 7.** Efecto de la altura del nivel del ducto al fondo de la paila sobre el consumo de bagazo.



**Figura 8.** Efecto de la geometría del fondo acanalado de las pailas sobre la energía aprovechada.

## CONCLUSIONES

- La eficiencia de utilización de la energía térmica de un horno para la elaboración de panela se incrementó considerablemente por el uso de pailas modificadas con canales. Se obtuvo una reducción del consumo de energía y combustible al cambiar la altura del nivel del ducto de los gases al fondo de la paila; disminuyendo la altura se contrae el área transversal del ducto y se concentra la carga energética en un menor volumen, ayudando a la transferencia de calor.
- Al disminuir el área del ducto, también aumenta la velocidad de los gases de combustión generando turbulencia y favoreciendo por tanto la transferencia de energía térmica. La geometría de los canales que presentó el mejor comportamiento fue la triangular, seguida de la trapezoidal y la circular.

- El bagazo ahorrado podría ser utilizado en otras industrias como la del papel para la generación de ingresos adicionales, mejorando la economía del proceso. El estudio puede ser utilizado para encontrar parámetros de operación y selección de evaporadores acanalados en las hornillas paneleras.
- Se recomienda realizar un estudio enfocado en la determinación de coeficientes de transferencia de calor de convección en el lado de los gases de combustión, de tal forma que se puedan efectuar análisis térmicos más rigurosos que permitan el mejoramiento del proceso.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Corpoica por el desarrollo del presente estudio, el cual hizo parte del proyecto de investigación titulado "Desarrollo de modelos demostrativos de hornillas paneleras de alta eficiencia térmica y bajo impacto ambiental, de acuerdo con los niveles socioeconómicos y técnicos de las principales regiones productoras de panela en Colombia".

## REFERENCIAS

1. ANWAR S.I., Fuel and energy saving in open pan furnace used in jaggery making through modified juice boiling/concentrating pans, Energy Conversion and Management 51 (2010) 360–364.
2. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT. Disponible en: <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx>. Fecha de consulta: 26 de Julio de 2011.
3. GARCÍA Hugo, ALBARRACÍN Luis, TOSCANO Adriana, SANTANA Natalia e INSUASTY Orlando. Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de caña panelera, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, 2007.
4. GARCÍA Hugo, SÁNCHEZ Zamir y RODRÍGUEZ Gonzalo. Desarrollo de modelos demostrativos de hornillas paneleras de alta eficiencia térmica y bajo impacto ambiental de acuerdo con los niveles socioeconómicos y técnicos de las principales regiones productoras de panela en Colombia.



- Corpoica, Programa de Procesos Agroindustriales. Informe de seguimiento 2010.
5. MANOHAR Rao PJ. Industrial utilization of sugar and its by products. New Delhi: ISPCK Publishers and Distributors; 1977.
6. P.V.K. JAGANNADHA Rao, MADHUSWETA Das b, S.K. Das, Changes in physical and thermo-physical properties of sugarcane, palmyra-palm and date-palm juices at different concentration of sugar, Journal of Food Engineering 90 (2009) 559–566.
7. Red de Información y Comunicación Estratégica del Sector Agropecuario. AGRONET. Disponible en: <http://www.agronet.gov.co/agronetweb/>. Fecha de consulta: 26 de Julio de 2011.
8. Southern African Sugar Technologists Association Laboratory Manual. SUGARTECH. Disponible en: <http://www.sugartech.co.za/extraction/bagasseCV/index.php>. Fecha de consulta: 26 de Julio de 2011.
9. Z.M. OMARA, MOFREH H. HAMED y A.E. KABEEL. Performance of finned and corrugated absorbers solar stills under Egyptian conditions, Desalination (2011), doi:10.1016/j.desal.2011.04.042.

---

**Recepción:** 2 de Agosto de 2011  
**Aceptación:** 20 de Diciembre de 2011