

**EFFECTO DEL PRECALENTAMIENTO DEL AIRE PRIMARIO Y EL CONTENIDO
DE HUMEDAD DEL BAGAZO DE CAÑA DURANTE LA COMBUSTIÓN EN
LECHO FIJO**

RAFAEL VICENTE DEAGUAS DIAZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2013

**EFFECTO DEL PRECALENTAMIENTO DEL AIRE PRIMARIO Y EL CONTENIDO
DE HUMEDAD DEL BAGAZO DE CAÑA DURANTE LA COMBUSTIÓN EN
LECHO FIJO.**

RAFAEL VICENTE DEAGUAS DIAZ

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al
Título de
Ingeniero Químico**

**Director de proyecto
HUMBERTO ESCALANTE HERNANDEZ
Ph.D**

**Co-director
ZAMIR SANCHEZ CASTRO
Ingeniero Químico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2013

AGRADECIMIENTOS

De una manera muy humilde expreso mi agradecimiento a las siguientes personas y/o instituciones:

A **Humberto Escalante Hernández**, Ph.D., Director de proyecto de grado, por brindarme ante todo una excelente educación, su orientación, disposición y apoyo durante todo este proceso.

Al ingeniero químico **Zamir Sánchez**, el cual me brindo un apoyo incondicional como profesional y como persona.

A la **Universidad Industrial de Santander** por ofrecerme la oportunidad de conocer el maravilloso mundo universitario y formarme como profesional.

A el **CIMPA** por brindarnos la posibilidad de realizar el trabajo en sus instalaciones y a todo el personal por ser tan amables con nosotros.

DEDICATORIA

*A mis padres Calixto Deaguas y Liz Diaz
Los cuales me brindaron todo su apoyo y amor
Gracias enseñarme las cosas buenas de la vida
Y convertirme en un persona de bien*

*A la familia Nuncira Valencia
Por hacerme parte de su hermosa familia*

*Y a todas aquellas personas
Con las cuales disfrute estos años de universidad*

Rafael Vicente De aguas Diaz.

NOTA ACLARATORIA

El presente trabajo de tesis de grado forma parte del proyecto de investigación de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, CORPOICA titulado **EFFECTO DEL PRECALENTAMIENTO DEL AIRE PRIMARIO Y EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL BAGAZO DE CAÑA DURANTE LA COMBUSTIÓN EN LECHO FIJO** y fue dirigido y financiado parcialmente por CORPOICA.

Por tanto, los derechos de autor son propiedad del estudiante, de la Universidad Industrial de Santander y de CORPOICA y los resultados obtenidos podrán ser transferidos a la sociedad colombiana en actividades sin ánimo de lucro.

Contenido

	Pag
INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. Combustión de biomasa en lecho fijo.	15
1.2 Humedad en el bagazo de caña	16
1.3 Efectos del precalentamiento de aire	17
2. MATERIALES Y MÉTODOS	18
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	20
3.1. Perfiles de temperatura y concentración del gas durante la combustión de BC. 20	
3.2. Tasa de combustión del BC.....	26
4. CONCLUSIONES.....	29
BIBLIOGRAFÍA.....	30

LISTA DE TABLAS

	PAG
Tabla 1. Diseño experimental para el análisis del precalentamiento del aire primario y la FMH.....	19
Tabla 2. Tiempo, temperatura en la zona primaria y secundaria y composición promedio del gas, durante la combustión de BC.	24

LISTA DE FIGURAS

	PAG
Figura 1. Regímenes de combustión de biomasa dependiendo del precalentamiento de aire	17
Figura 2. Horno del lecho fijo para combustión de BC..	18
Figura 3. Perfiles de temperatura en el lecho durante la combustión de BC..	21
Figura 4. Perfiles de concentración de CO ₂ , CO y O ₂ durante la combustión de BC.	23
Figura 5. Tasa de combustión del BC en base seca como función de la FMH y el precalentamiento del aire primario.... ..	26
Figura 6. Concentración promedio de CO ₂ y CO como una función de la tasa de combustión del BC.	27

RESUMEN

TÍTULO: EFECTO DEL PRECALENTAMIENTO DEL AIRE PRIMARIO Y EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL BAGAZO DE CAÑA DURANTE LA COMBUSTIÓN EN LECHO FIJO.*

AUTORES: Rafael Vicente De aguas Diaz. **

PALABRAS CLAVE: humedad, precalentamiento de aire, combustión, biomasa, bagazo de caña, lecho fijo.

El contenido de humedad en las biomásas es uno de los problemas de las industrias que utilizan combustibles sólidos, la industria panelera no se encuentra fuera de esta situación, las altas humedades en el combustible generan eficiencias energéticas bajas lo que conlleva a utilizar llanta y madera, lo cual genera un impacto ambiental negativo. Una alternativa para mitigar los efectos de la humedad es el precalentamiento de aire.

El 30% de las pérdidas energéticas de una hornilla panelera corresponde a calor sensible en los gases de chimenea. En muchos sistemas de combustión parte de este calor se reutiliza para el precalentamiento del aire. La implementación de sistemas de recirculación de calor podría mejorar la eficiencia térmica en hornillas paneleras, No obstante esta modificación en los diseños actuales de hornillas aumentaría los costos de construcción. Por este motivo no es posible realizar tales implementaciones sin un estudio detallado de sus beneficios.

En este trabajo se analizaron los perfiles de temperatura y los perfiles de concentración de gases durante la combustión de bagazo de caña en un horno de lecho fijo, con esto se pudo determinar los frentes de reacción, las tasas de combustión y la conversión de carbono a dióxido de carbono, lo cual brinda un índice del rendimiento del proceso y de la eficiencia energética del proceso.

Con base a estos resultados se puede evidenciar los efectos del precalentamiento de aire sobre la humedad y las mejores condiciones de operación de estos sistemas de combustión.

*Proyecto de Grado

** Facultad: Ingenierías Físicoquímicas. Escuela: Ingeniería Química. Director: Ph.D. Humberto Escalante Hernández. Codirector: Ingeniero Zamir Sánchez Castro.

ABSTRACT

TÍTULO: Effect of primary air preheating and moisture content dampness of sugarcane bagasse during the combustion in a fixed bed.*

AUTHORS: Rafael Vicente De aguas Diaz **

Key Words: moisture, air preheating, combustion, biomass, sugarcane bagasse, fixed bed

Moisture content of biomass is one of the problems in industries where solid fuels are used, the panela industry is not excepted of this situation, The elevate moisture in the fuel generates low energetic efficiency so it carries to use tires or wood, which generate a negative environmental impact. An alternative to mitigate the moisture effects is the air preheating.

30% of the energetic losses of a panelera burner correspond to the sensible heat in the chimney gases. In most of the combustion systems part of the heat is reused for the air preheating. The implementation of heat re circulation systems could improve the energetic efficiency in panelera burners, But this change in current designs of burners increase construction costs. For this reason you can't make such implementations without a detailed study of its benefits.

In this work the temperature profiles and the concentration profiles are analyzed during the sugarcane combustion in a fixed bed burner. With this was possible determined the reaction fronts, the combustion rates and the conversion of carbon to carbon dioxide, which offers an index of the process output and the energetic efficiency of the process.

In base of these results it can be seen the air preheating effects on the moisture and the best operating conditions in these combustion systems.

* Grade Project

**Faculty: Physicochemical Engineering. School: Chemical Engineering. Director: Ph.D. Escalante Humberto Hernandez. Co-director: Engineer Zamir Sanchez Castro.

INTRODUCCIÓN

Colombia es el segundo productor mundial de panela, después de la India, con una producción estimada de 1470 000 t/año, contribuyendo en el 7.3 % del Producto Interno Bruto (PIB) agrícola. En toda la cadena de producción de panela se generan cerca de 25 millones de jornales al año y se emplean alrededor de 350 000 personas. Colombia también se constituye como el primer consumidor per cápita de panela con 37.3 kg/habitante-año [1].

En el país existen cerca de 250 000 ha sembradas en caña de azúcar (*Saccharum officinarum L*) para la producción de panela. Esta caña se cultiva a altitudes entre los 300 y los 1800 msnm, bajo condiciones de alta intensidad lumínica y temperaturas medias cercanas a los 26 °C. Los tallos de la caña son cortados en periodos comprendidos entre 8 meses y 24 meses, dependiendo del tipo de corte (entre saque o por parejo) y las condiciones de cultivo. Los tallos son transportados a la planta de producción de panela, denominada trapiche, donde son molidos para obtener el jugo y un subproducto llamado bagazo de caña (BC). El BC es almacenado en cobertizos donde se seca naturalmente hasta alcanzar fracciones másicas de humedad del 30 % [2].

Se estima que el rendimiento promedio de caña en Colombia es de 60 t/ha. Teniendo en cuenta que cerca del 40 % de la masa de la caña corresponde a BC, la generación de este desecho agrícola en Colombia se puede estimar en 6 millones de t/año. El BC del sector panelero posee una composición másica (en base seca) de: 49.27% de carbono, 42.87% de oxígeno, 5.67% de hidrógeno, 1.60% de cenizas y algunas trazas de nitrógeno y azufre, con un poder calorífico inferior (PCI) de 19 374.24 kJ/kg [3]. La utilización de este tipo de residuos como fuente de energía, se ha convertido a nivel mundial en una opción poderosa para mitigar el efecto invernadero [4].

La zona del trapiche donde se realiza el proceso de producción se denomina hornilla panelera, la cual consta de: una cámara de combustión, un ducto de humos, un tren de evaporadores y una chimenea [5]. Durante el proceso se debe suministrar energía calórica para evaporar el jugo hasta una concentración de 94

°B. Para este propósito las hornillas utilizan como combustible el BC en cámaras de combustión de lecho fijo. Sin embargo debido a que la eficiencia energética del sector no supera el 50 %, se debe utilizar adicionalmente madera, carbón y caucho de llantas usadas, generando inconvenientes ambientales y aumentando el costo de producción [6].

La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA) desarrolló la cámara de combustión Ward-Cimpa. Esta cámara posee un volumen de reacción mucho mayor a las tradicionales. Además cuenta con una rampa de presecado que permite utilizar el BC directamente de los molinos con fracciones másicas de humedad hasta del 50 %. La cámara Ward-Cimpa se divide en una zona primaria y una zona secundaria de combustión. En la zona primaria se ubica el lecho de BC el cual reacciona con un flujo de aire primario que ingresa a través de la parrilla. Los volátiles y el material inquemado que escapa al lecho reaccionan en la zona secundaria con un flujo de aire adicional que ingresa sobre el lecho [5].

La combustión en lecho fijo de madera [6], paja [8] y desechos sólidos municipales [9,10] ha demostrado que el contenido de agua del residuo afecta sus cualidades como combustible. Biomásas con altos contenidos de humedad presentan grandes tiempos de secado, lo cual retrasa el inicio de la etapa de devolatilización, disminuyendo las tasas de combustión. Simulaciones de la descomposición térmica de bloques [11] y troncos [12] de madera indican que el aumento de la humedad ocasiona una sobreposición de las etapas de secado, devolatilización y oxidación del material carbonizado. Este efecto conlleva a la reducción en el rendimiento del proceso.

Durante la combustión de biomasa en lecho fijo la etapa de evaporación ocurre a temperaturas por debajo del punto de ebullición. Por este motivo la evaporación es controlada mayormente por la transferencia de humedad del sólido al gas [13]. El incremento en la temperatura del aire primario aumenta la fracción molar de agua que soporta antes de alcanzar el equilibrio [14], elevando las tasas de secado. Este efecto mejora la etapa de devolatilización de la biomasa [15,16] y, por consiguiente, incrementa las tasas de combustión [8,13].

El 30% de las pérdidas energéticas de una hornilla panelera corresponde a calor sensible en los gases de chimenea [17]. En muchos sistemas de combustión parte de este calor se reutiliza para el precalentamiento del aire [18]. La implementación de sistemas de recirculación de calor podría mejorar la eficiencia térmica en hornillas paneleras. No obstante esta modificación en los diseños actuales de hornillas aumentaría los costos de construcción. Por este motivo no es posible realizar tales implementaciones sin un estudio detallado de sus beneficios.

El objetivo del presente trabajo fue realizar una investigación de la influencia de la fracción másica de humedad (FMH) y del precalentamiento del aire primario (PAP) sobre el rendimiento de la combustión de BC en hornos de lecho fijo, con la finalidad de establecer las mejores condiciones de operación. Estos análisis se realizaron a partir de los perfiles de temperatura y concentración del gas de combustión.

1.1. Combustión de biomasa en lecho fijo

La combustión de biomasa ocurre en tres etapas: secado, devolatilización y oxidación del material carbonizado. Inicialmente la humedad es liberada a temperaturas por debajo de los 100°C. El material seco incrementa su temperatura hasta el punto de devolatilización. Para BC la descomposición térmica inicia entre 200°C [19] y 250°C [20] y culmina a los 600°C [21]. Los volátiles liberados reaccionan con el aire a 400°C formando una llama [19]. Al final de la devolatilización queda un residuo denominado material carbonizado, el cual reacciona con el aire a temperaturas cercanas a los 650 °C [22].

Cuando la combustión de la biomasa se lleva a cabo en hornos del lecho fijo, las tres etapas ocurren como frentes que se propagan en contracorriente con el aire primario [7]. El calor transferido desde la llama, tanto por convección como por radiación, a las capas de biomasa fresca permite el secado y la devolatilización del material [26]. Los volátiles liberados y el material carbonizado formado se oxidan liberando más calor y permitiendo la propagación estable de los frentes [23].

El rendimiento de la combustión de biomasa en lecho fijo puede ser analizado a partir de la temperatura y la composición del gas. El perfil de temperatura en el lecho permite determinar indirectamente la tasa de combustión del combustible [13]. Las concentraciones de CO₂ y CO en el gas de combustión indican el grado de conversión del carbono contenido en la biomasa [9] y por ende son un indicador del rendimiento del proceso.

Debido a la oxidación de los volátiles y la presencia de llama, el frente de devolatilización se denomina “frente de ignición” [3] o “frente de flama” [13]. Por el alto contenido de material volátil (fracciones másicas superiores al 70 %) [4], la tasa de combustión de biomasa generalmente se define con base a la velocidad de propagación del frente de ignición como lo indica la ecuación 1 [13].

$$v_f = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1)$$

Donde ΔS [m] es la distancia entre dos puntos de medición de temperatura adyacentes y Δt [s] el tiempo que necesario para que el frente de devolatilización se desplace esta distancia. Δt se obtiene directamente de los perfiles de temperatura, tomando como referencia para el frente de ignición una temperatura de 400 °C [19].

La velocidad de propagación del frente de ignición y la densidad aparente inicial del lecho (ρ_a en kg/m³) permiten evaluar indirectamente la tasa de combustión (r_c en (kg/(m² s))) de la biomasa [13].

$$r_c = v_f * \rho_a \quad (2)$$

1.2 Humedad en el bagazo de caña

La humedad del combustible representa uno de los problemas más grandes para este tipo sistemas de combustión. El agua dentro de la matriz del combustible puede existir como vapor, agua químicamente ligada y agua libre en los poros. El agua inicialmente es ligada hasta que todos los sitios activos para absorción son llenados, este es el punto de saturación de la fibra, luego llena los poros como agua libre. El agua ligada se mantiene unida a la fibra con una mayor energía que

el agua libre; por este motivo el tiempo de secado se considera función del contenido de humedad, tamaño de partícula y temperatura, para evaporar esta cantidad de agua el frente de reacción requiere una un tiempo adicional, lo que conlleva a una reducción de la tasa global de combustión [8].

1.3 Efectos del precalentamiento de aire

En los grandes hornos el precalentamiento se utilizó como una técnica para secar el combustible, pero el tiempo de residencia del aire precalentado en el lecho es muy corto, lo cual conlleva a formar un frente de secado en la parte inferior del lecho, al utilizar precalentamiento de aire ocurren otros fenómenos adicionales debidos a la formación de este frente de secado que viaja en dirección opuesta del frente de reacción, uno de estos fenómenos es la combustión total del lecho al momento de encontrarse el frente de secado con el frente de reacción [24]. Tal como es mostrado en la figura 1(b). Otro fenómeno que ocurre por el precalentamiento de aire es la disminución de la tasa de combustión en las primeras etapas de la combustión, debido a que el aire precalentado evapora una gran parte de la humedad del combustible cercano a la parrilla, este vapor asciende por el lecho, haciendo que el frente de reacción disminuya su velocidad y produciendo bastante humos. A pesar de esto los tiempos de combustión son mucho menores que sin precalentamiento [26]

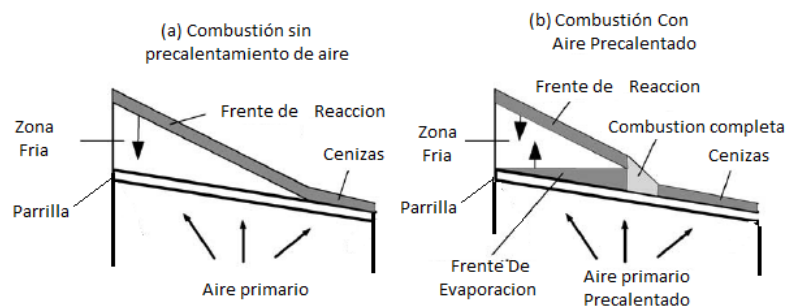


Figura 1 Regímenes de combustión de biomasa dependiendo del precalentamiento de aire

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La combustión del BC se llevó a cabo en un horno de lecho fijo (0.3 m x 0.3 m x 2.23 m), con paredes de ladrillo refractario de 0.2 m de grosor, recubierto con aislante térmico de fibra de vidrio (Figura 2). El horno posee dos entradas para el aire. El flujo de aire primario se alimentó a través de la parrilla, mientras que el flujo secundario se abasteció a través de dos orificios de 5.0cm de diámetro. Los flujos de aire primario y secundario, por área de parrilla, se mantuvieron en $0.75 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ y $0.84 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ respectivamente; y fueron suministrados por medio de dos ventiladores centrífugos con potencia variable.

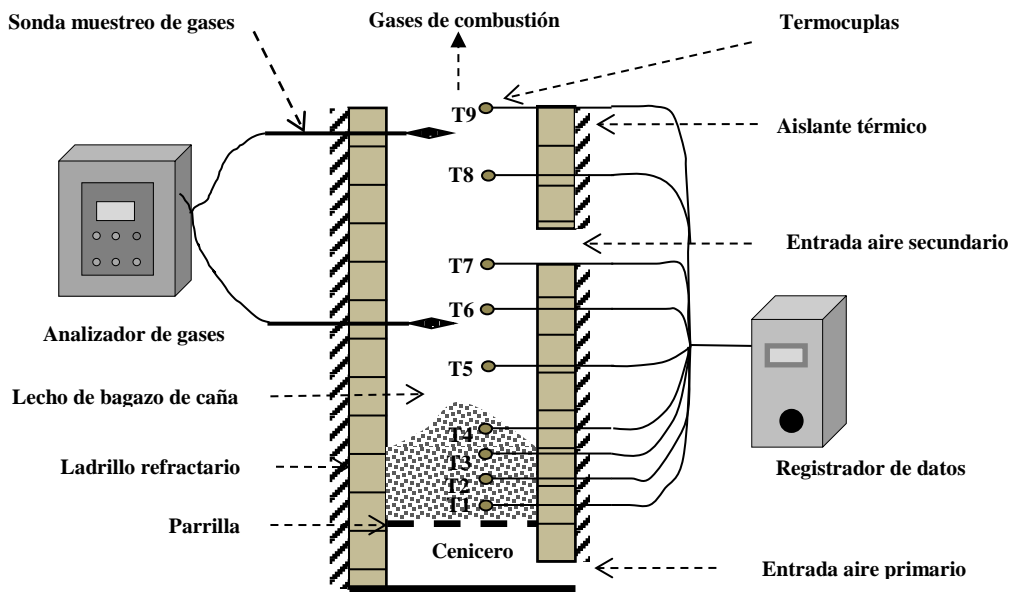


Figura 2. Horno del lecho fijo para combustión de BC.

Las temperaturas en el horno fueron registradas por 9 termocuplas marca Instrumatic tipo K, ubicadas a 15 cm de profundidad y distribuidas así: 4 en la zona primaria (lecho) con una distancia de 10 cm entre ellas y 5 en la zona secundaria con una distancia promedio de 30 cm entre ellas. Las termocuplas se conectaron a un equipo registrador de datos para almacenar los valores de las temperaturas cada 10 s. La composición del gas de combustión se determinó a la salida del horno, mediante un equipo analizador portátil marca TESTO 350 XL con capacidad de lectura en línea cada 5 s.

El BC se recolectó en un trapiche panelero del municipio de Barbosa en Santander - Colombia (05°55'57" latitud norte y 73°37'16" longitud oeste). El BC se secó a condiciones ambientales de temperatura y presión hasta alcanzar FMH de 10 %, 30 % y 42 %. Posteriormente, el BC se redujo de tamaño mediante un molino de martillos marca Farm King 51001. El BC molido se clasificó con tamices estandarizados (ASTM E-11/95), permitiendo la separación de partículas con geometría aproximada a la cilíndrica (2 cm de longitud y 0.10 cm de diámetro). Para las pruebas de PAP se utilizó una resistencia eléctrica de 8 kW con control de temperatura, la cual permitió mantener el aire a 120 °C.

La combustión del BC se realizó en operación discontinua, utilizando cargas variables de bagazo (dependientes de la humedad). Durante las pruebas la ignición del lecho de BC se realizó en la superficie con ayuda de un mechero de ACPM. Para evaluar el efecto de la FMH y el PAP se estructuró un diseño factorial mixto 3x2, que condujo a realizar 6 experimentos (Tabla 1), con su respectivo duplicado.

Experimento	FMH (%)	PAP	Carga de BC (kg)
1	10	No	1.7
2	10	Si	1.7
3	30	No	2,1
4	30	Si	2.1
5	42	No	2.5
6	42	Si	2.5

Tabla 1. Diseño experimental para el análisis del precalentamiento del aire primario y la FMH

Las velocidad de propagación de frente de ignición fue un promedio de las calculadas para cada intervalo de temperatura por medio de la ecuación 1, con un $\Delta S = 0.1$ m. La tasa de combustión del BC se obtuvo a partir de la ecuación 2. Las temperaturas de combustión de la zona primaria y secundaria se calcularon como un promedio de las temperaturas máximas registradas en el lecho (T1-T4) y sobre el lecho (T5-T10), respectivamente.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

3.1. Perfiles de temperatura y concentración del gas durante la combustión de BC

En la Figura 3 se presentan los perfiles de temperatura en el lecho. Inicialmente el calor desprendido de la fuente de ignición permite secar y devolatilizar las partículas BC en la superficie del lecho. Los volátiles y el material carbonizado producido reaccionan con el flujo de aire primario desarrollando el frente de ignición, el cual se propaga hasta el fondo del lecho, incrementando las temperaturas secuencialmente desde la más superficial (T4) hasta la más interna (T1). Las temperaturas máximas registradas se encuentran en un rango de 870 °C a 1050 °C.

Durante las pruebas de combustión del BC sin PAP el incremento en la FMH ocasionó la formación de dos picos de temperatura. Simulaciones realizadas para la combustión de paja en lecho fijo por Zhou *et al.*[13], evidencian la formación de dos zonas en el horno: una zona de combustión intensa y una zona de precalentamiento. Para la combustión de BC el primer pico de temperatura se logra cuando el frente de ignición llega a la termocupla T1, ubicada a 10 cm sobre la parrilla, indicando la zona de combustión intensa. El fondo del horno funciona como una zona de precalentamiento del aire primario que ingresa a 25 °C, lo cual ocasiona un enfriamiento del lecho. Sin embargo debido a que en esta zona la concentración de O₂ es cercana a la atmosférica (fracción volumétrica del 21%), las tasas de oxidación tienden a incrementarse liberando más calor y alcanzando el segundo pico de temperatura. Este efecto se acentúa durante la combustión de BC con FMH superiores al 10 % debido al incremento en el calor perdido por evaporación.

Para todos los experimentos de combustión del BC el incremento en la FMH causó un aumento en el tiempo de combustión (tiempo tomado por el frente de ignición en llegar al fondo del lecho). El incremento en el contenido de agua de una biomasa aumenta el tiempo de secado, lo cual retrasa el inicio de la etapa de devolatilización e incrementa el tiempo total de la combustión. Este

comportamiento está en concordancia con el reportado para la combustión de desechos sólidos municipales el lecho fijo, donde el aumento en la FMH desde 30 % hasta 50 % ocasiona un incremento del tiempo de proceso entre un 65% [9] y un 140% [10].

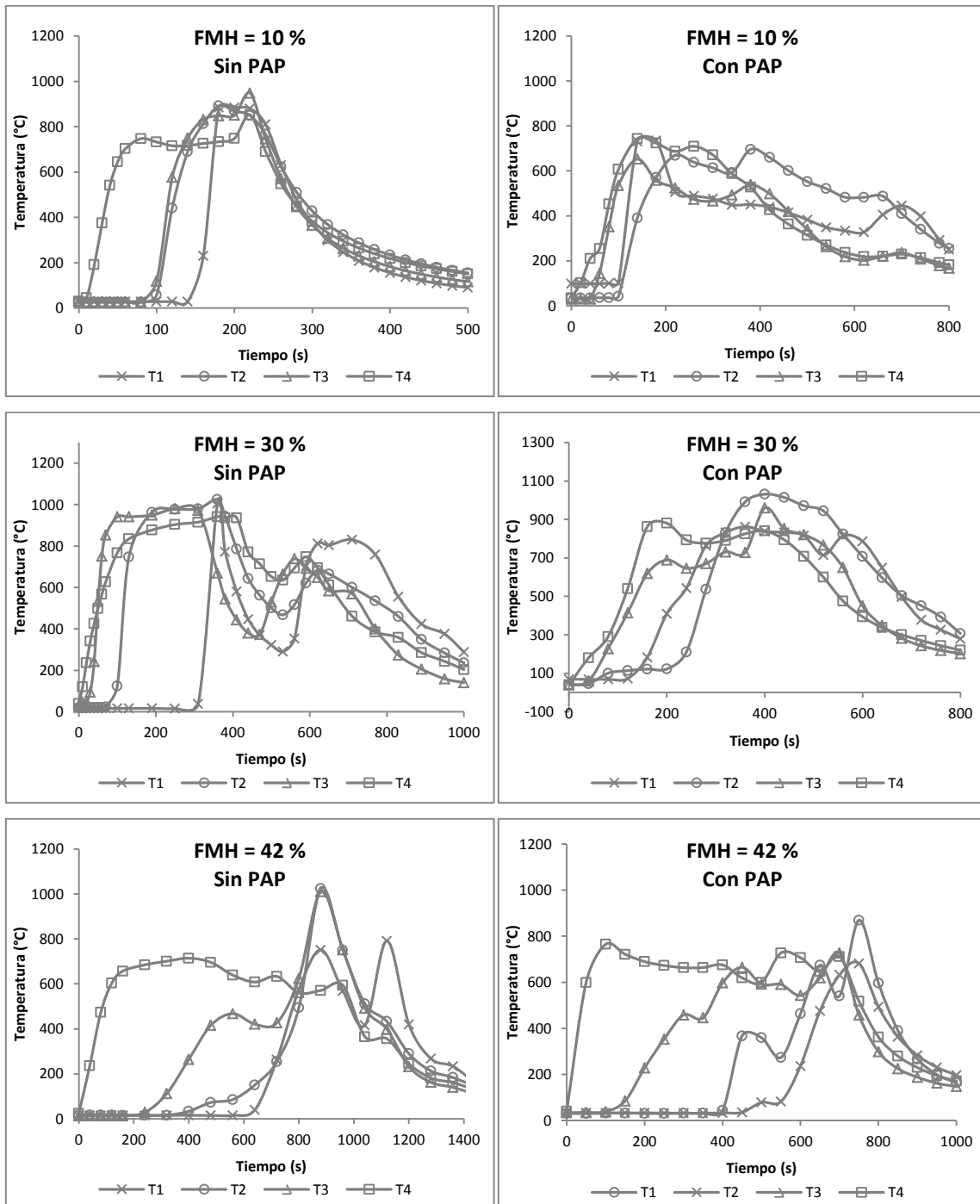


Figura 3. Perfiles de temperatura en el lecho durante la combustión de BC.

El incremento en la temperatura del aire primario mejora la transferencia de masa y calor, reduciendo el tiempo de secado de las partículas de BC ubicadas en el fondo del lecho. Durante la combustión de BC con FMH de 10 % y 30 % la liberación de la humedad cerca a la parrilla es casi instantánea, por lo tanto la temperatura inicial registrada en la termocupla T1 es de 98 °C y 70 °C, respectivamente. Este efecto origina la formación de un segundo frente de secado moviéndose desde el fondo hasta la superficie del lecho. En la Figura 3 la temperatura registrada en la termocupla T1 inicia su ascenso antes de la termocupla T2, evidenciando la formación del segundo frente de secado. Cuando la FMH del BC se incrementa hasta 42 % la temperatura de precalentamiento (120 °C) no es suficiente para reducir significativamente el tiempo de liberación de la humedad, por lo cual no se observa el segundo frente de secado.

La implementación del PAP redujo el tiempo de combustión del BC para todas las FMH. Yang *et al.*[16] en su estudio de gasificación de madera encontró que el incremento en la temperatura del aire primario mejora la devolatilización y por ende reduce el tiempo del proceso. Por otra parte, a medida que el segundo frente de secado avanza hacia la superficie del lecho también lo hace el frente de ignición hacia el fondo. Según Van Kessel *et al.*[24] estos dos frentes se encuentran en un momento dado e incrementan la velocidad de ignición del material. Para la combustión del BC con FMH del 10 % y 30 % los dos frentes se encuentran a la altura de la termocupla T2 (20 cm de lecho), cerca de 100 s después de la ignición del material. La reducción en el tiempo de combustión es menor para BC con FMH del 42 %, por no presentar el segundo frente de secado.

En la figura 4 se observa el comportamiento de las concentraciones de CO₂, O₂ y CO con el tiempo durante la combustión del BC.

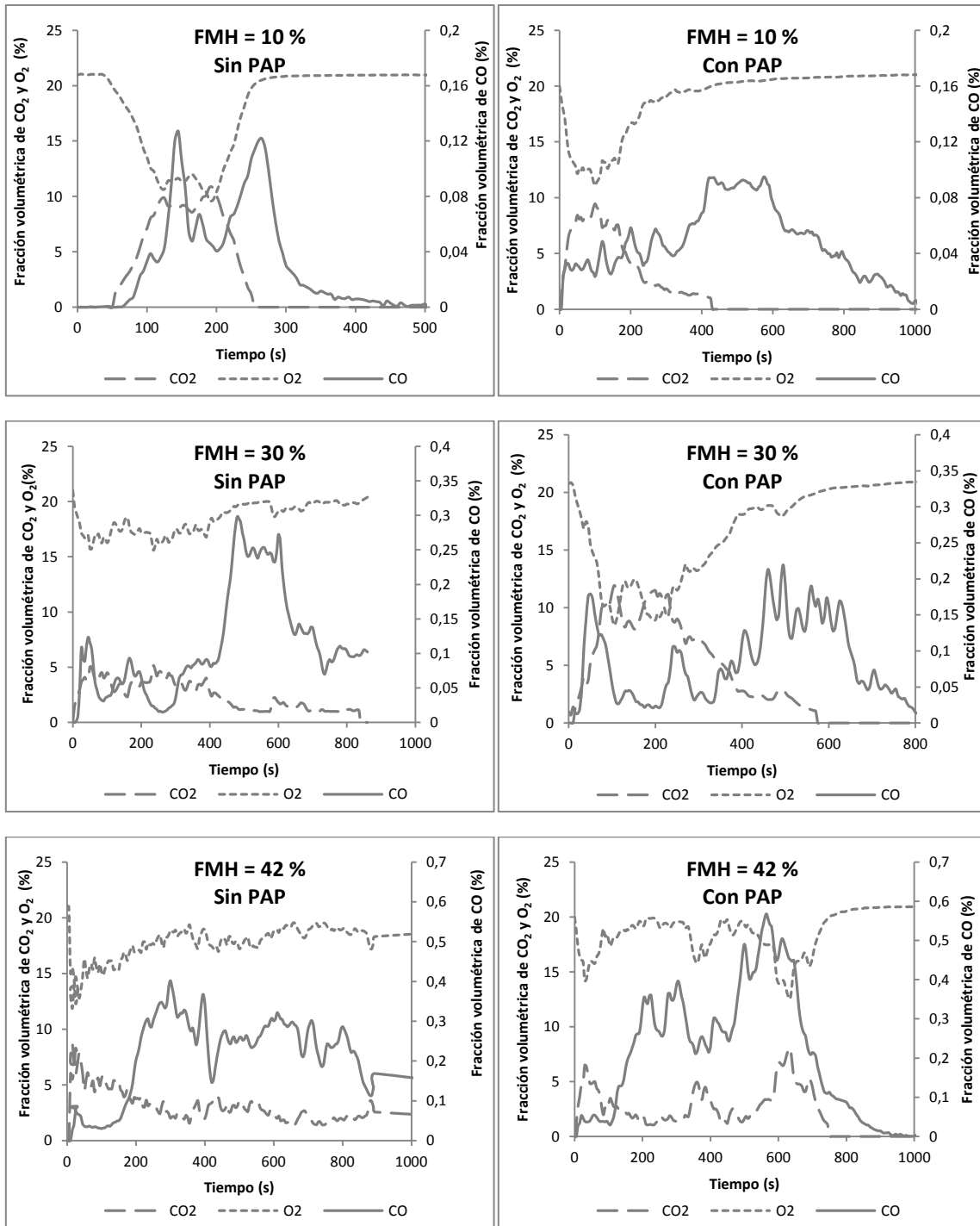


Figura 4. Perfiles de concentración de CO₂, CO y O₂ durante la combustión de BC.

A medida que el frente de ignición se genera en la superficie del lecho de BC las concentraciones de CO₂ y CO incrementan debido a la oxidación conjunta de los volátiles y el material carbonizado, mientras el O₂ decae. Cuando el frente se ha desarrollado completamente la concentración de CO₂ alcanza un valor casi

estable, el cual mantiene por un determinado tiempo. Por su parte el CO presenta grandes fluctuaciones durante este periodo. Al final del proceso de combustión cuando el frente de ignición llega al fondo del lecho, las concentraciones de CO₂ y CO decaen lentamente debido a la oxidación del material carbonizado remanente sobre la parrilla y en el cenicero, a su vez el O₂ se eleva hasta sus valores atmosféricos.

A mayor contenido de humedad del BC la tasa de liberación de volátiles se reduce, lo cual se ve reflejado en una oxidación más lenta. Este hecho resulta en una prolongación del periodo de tiempo en el cual la concentración de CO₂ mantiene su valor casi constante. Las máximas fracciones volumétricas registradas estuvieron en un rango de 8 % a 12 % para el CO₂ y 0.1 % a 0.6 % para el CO.

En la Tabla 2 se presentan el tiempo de combustión, la temperatura en la zona primaria (lecho) y la concentración promedio del gas de combustión, extraídos de las Figuras 3 y 4. Además se presenta la temperatura de la zona secundaria del horno.

FMH (%)	PAP	Tiempo de combustión (s)	Temperatura en la zona primaria (°C)	Temperatura en la zona secundaria (°C)	Fracción volumétrica del gas de combustión (%)		
					CO ₂	O ₂	CO
10	No	174	900	720	6.94	13.72	0.052
10	Si	140	730	660	4.30	16.48	0.044
30	No	310	1010	620	2.47	18.41	0.114
30	Si	260	950	630	5.88	14.83	0.088
42	No	774	890	620	3.21	14.86	0.216
42	Si	600	770	600	3.01	17.82	0.275

Tabla 2. Tiempo, temperatura en la zona primaria y secundaria y composición promedio del gas, durante la combustión de BC.

La disminución en la tasa de oxidación de volátiles con el incremento en la FMH, permite que más O₂ quede disponible para reaccionar con el material carbonizado. Por este motivo, inicialmente cuando la FMH se incrementa de un 10 % a un 30 %, la temperatura promedio del lecho se eleva para todas las pruebas. Sin embargo, para FMH por encima del 30 % el calor adicional liberado por la oxidación del material carbonizado es consumido durante la evaporación, reduciendo las

temperaturas nuevamente. Resultados similares han sido reportados para la combustión de paja de maíz [8], donde la temperatura máxima se obtuvo para un residuo con una FMH de 32 %.

El PAP ocasiona una reducción en la temperatura máxima promedio en el lecho, para todas las FMH. Durante las pruebas de combustión del BC con PAP la velocidad superficial del aire primario fue de 0.63 m/s. El incremento en la temperatura de 25 °C a 120 °C disminuyó la densidad del aire de 1.184 kg/m³ a 0.8979 kg/m³ [25]. Debido a que el flujo másico del aire se mantuvo constante en 0.75 kg/m² s, la reducción en la densidad causó que la velocidad superficial aumentara a 0.83 m/s. A mayor velocidad superficial menor es el tiempo de residencia del aire en el lecho de BC y, en consecuencia, el tiempo de contacto con las partículas del combustible. Por este motivo la cantidad de carbono que se oxida en el lecho se reduce disminuyendo la temperatura en la zona primaria. Este resultado concuerda por el reportado por Zhao *et al.*[8] en un rango de temperatura de aire primario de 20 °C a 130 °C.

La reducción en tiempo de combustión con el PAP primario conlleva a un incremento en la cantidad de BC consumido por unidad de tiempo. Sin embargo se puede observar que para el BC con FMH de 10 % y 42 % esto provoca una reducción en la temperatura de la zona secundaria y de la concentración promedio de CO₂, indicando que gran parte del carbono queda sin reaccionar en el lecho. A pesar que en la combustión de BC con FMH del 30 % el tiempo de residencia del aire primario en el lecho disminuye con el PAP, parte del material carbonizado es convertido a CO, el cual es arrastrado junto a las volátiles a la zona secundaria donde reaccionan aumentando la temperatura y las concentraciones de CO₂. Por su parte las concentraciones promedios de CO se mantuvieron bajas durante todas las pruebas.

La menor temperatura registrada en el lecho (730 °C) corresponde a la combustión de a BC con FMH del 10 % sin PAP, mientras la mayor temperatura (1010 °C) la presentó el BC con FMH de 30 % con PAP. Este rango de temperatura está dentro del reportado para la combustión de paja en lecho fijo [8,13], con temperaturas de aire primario entre 20 °C y 170 °C.

3.2. Tasa de combustión del BC

La tasa de combustión del BC en base seca, calculada a partir de la ecuación 2, se presenta en la Figura 55.

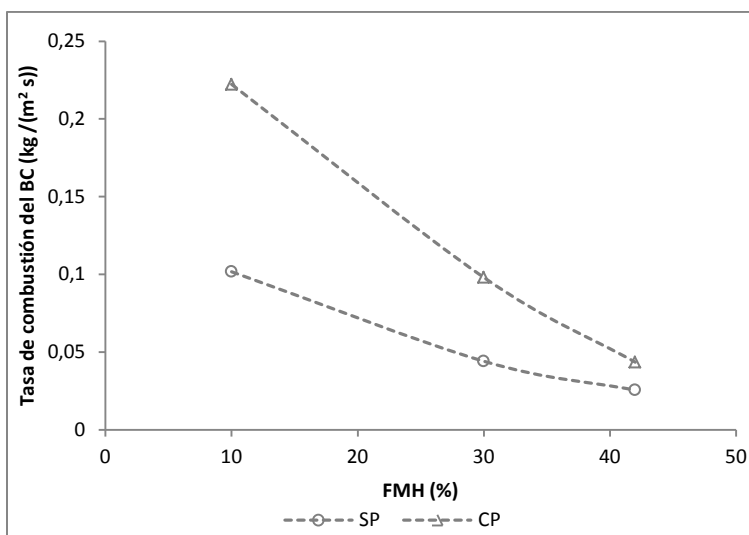


Figura 5. Tasa de combustión del BC en base seca como función de la FMH y el precalentamiento del aire primario.

En la Figura 5 observa una reducción en la tasa de combustión en base seca del BC con el aumento de la FMH. Liang *et al.* [9] encontró esta misma tendencia en la tasa de combustión de desechos sólidos municipales en lecho fijo con FMH entre 10 % y 50 %. El incremento en el agua contenida en las fibras de una biomasa reduce la liberación de volátiles y su tasa de oxidación, lo cual sumado al aumento en el calor necesario para la evaporación conlleva a una disminución de la energía liberada en la zona de reacción. Por este motivo el calor transferido desde la llama a las subsecuentes capas de biomasa decae reduciendo la velocidad de propagación del frente de ignición y por ende la tasa de combustión del BC.

El PAP reduce el tiempo de combustión lo cual redundaría en un incremento en la tasa de combustión del BC. No obstante el efecto del PAP es menor para altos niveles de humedad; mientras que para una FMH de 10 % la tasa de combustión incrementa de 0.102 kg/(m² s) a 0.222 kg/(m² s), para una FMH de 42 % el

aumento fue de 0.026 kg/(m² s) a 0.043 kg/(m² s). Tendencias similares de la tasa de combustión con el PAP son reportadas durante la combustión de paja [8,13] y gasificación de madera [16] en lecho fijo.

En la Figura 6 se presenta las concentraciones promedio de CO₂ y CO como función de la tasa de combustión del BC en base seca.

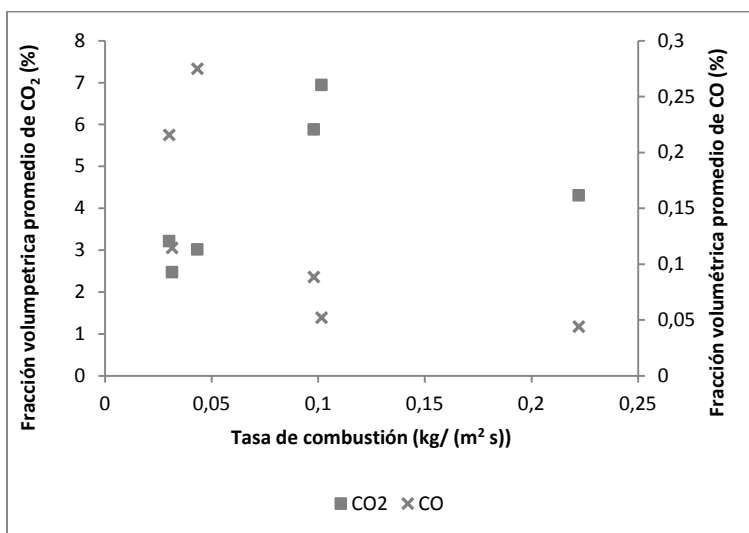


Figura 6. Concentración promedio de CO₂ y CO como una función de la tasa de combustión del BC.

En la combustión de biomasa se buscan altas tasas de combustión junto con la mayor conversión de carbono a CO₂, con el fin de obtener el mayor rendimiento y la mayor liberación de energía calórica. En la Figura 6 se observa que las mayores concentraciones de CO₂ y menores concentraciones de CO se consiguen manteniendo una tasa de combustión de BC cercana a 0.1 kg/(m² s). Estas condiciones se logran durante la combustión de BC con FMH de 10 % sin PAP y FMH del 30 % con PAP. La mayor tasa de combustión se logra utilizando BC con FMH del 10 % con PAP, sin embargo tanto las concentraciones de CO₂ como las de CO decaen; por balance del carbono se puede deducir que esto conlleva a un aumento en la cantidad de material inquemado. Por su parte la combustión de BC con FMH de 42 % presenta las tasas de combustión más bajas, las menores

concentraciones de CO_2 y las mayores de CO , y no se ve mejorada con el PAP. Por lo tanto se puede concluir que el PAP solo es recomendable durante la combustión de BC con FMH del 30 %.

4. CONCLUSIONES

Durante la combustión de bagazo de caña en lecho fijo las variables temperaturas (en el lecho y fuera de este), la composición del gas y la tasa de combustión fueron afectadas por la fracción másica de humedad y el precalentamiento de aire primario. El aumento en el contenido de humedad del BC genera una reducción en el rendimiento del proceso, el cual se ve reflejado en una disminución en la tasa de combustión y en la conversión carbono a CO₂. El precalentamiento de aire primario genera la formación de un frente secundario de secado moviéndose desde el fondo hacia la superficie del lecho para fracción másica de humedad del 10 % y 30 %. La formación del segundo frente de secado aumenta las tasas de combustión del bagazo de caña, sin embargo para el caso de la fracción másica de humedad del 10 % esto conlleva a incrementar las pérdidas por material inquemado. Para la combustión de bagazo de caña con fracción másica de humedad del 42 % no se evidencia la formación del segundo frente de secado, por lo tanto el PAP tiene poco efecto sobre esta humedad. Por lo anterior, solo es recomendable utilizar un sistema de precalentamiento durante la combustión de BC con FMH del 30 %.

La tasa de combustión es una variable a tener en cuenta para garantizar una combustión con un alto grado de conversión. Incluir un sistema de precalentamiento de aire podría ser una solución para controlar la tasa de combustión de bagazo de caña, mantener valores cercanos a 0.1 kg/(m² s) implicaría una mejora en las emisiones de chimenea al ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

- [21] Asadullah M, Rahman MA, Ali MM, Rahman MS, Motin MA, Sultan MB, et al. Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse. *Fuel* 2007; 86(16): 2514-20.
- [11] Bryden KM, Hagge MJ. Modeling the combined impact of moisture and char shrinkage on the pyrolysis of a biomass particle. *Fuel* 2003; 82(13): 1633- 44.
- [22] Daood SS, Munir S, Nimmo W, Gibbs BM. Char oxidation study of sugar cane bagasse, cotton stalk and Pakistani coal under 1% and 3% oxygen concentrations. *Biomass Bioenerg* 2010; 34(3): 263-71.
- [4] Demirbas A. Combustion characteristics of different biomass fuels. *ProgEnergyCombust* 2004; 30(2): 219-30.
- [15] Doherty W, Reynolds A, Kennedy D. The effect of air preheating in a biomass CFB gasifier using ASPEN Plus simulation. *Biomass Bioenerg* 2009; 33(9): 1158-67.
- [3] Escalante H, Orduz J, Zapata HJ, Cardona MC, Duarte M. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Bucaramanga: Ediciones Universidad Industrial de Santander; 2011.
- [12] Galgano A, Di Blasi C. Modeling the propagation of drying and decomposition fronts in wood. *Combust Flame* 2004; 139(1-2): 16-27.
- [2] García HR, Albarracín LC, Toscano A, Santana NJ, Insuasty O. Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de caña panelera. Bogotá: Produmedios editorial para el sector agropecuario; 2007.
- [6] García HR. Informe presentado al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) del proyecto denominado: desarrollo de modelos demostrativos de hornillas 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. Bogotá: Corpoica; 2011. Informe final.

- [17] Gonzales KL. Determinación de pérdidas energéticas y sus puntos críticos en hornillas paneleras Ward-Cimpa en la hoya del río Suárez [Tesis]. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander; 2010.
- [5] Gordillo G, García HR. Manual para el diseño y operación de hornillas paneleras. Barbosa: Corpoica; 1992.
- [23] Kausley SB, Pandit AB. Modelling of solid fuel stoves. *Fuel* 2010; 89(3): 782-91.
- [9] Liang L, Sun R, Fei J, Wu S, Liu X, Dai K, et al. Experimental study of effects of moisture content on combustion characteristics of simulated municipal solid waste in a fixed bed. *Bioresour Technol* 2008; 99(15), 7238-46.
- [14] McCabe WL, Smith JC, Harriott P. Operaciones unitarias en ingeniería química. 4a ed. Madrid: MacGraw Hill/Interamericana; 1991.
- [1] Osorio G. Manual: Buenas Prácticas Agrícolas -BPA- y Buenas Prácticas de Manufactura-BPM- en la producción de caña y panela. Medellín: CTP PrintLtda; 2007.
- [7] Porteiro J, Patiño D, Collazo J, Granada E, Moran J, Miguez JL. Experimental analysis of ignition front propagation of several biomass fuels in a fixed-bed combustor. *Fuel* 2010; 89(1): 26-35.
- [19] Ramajo-Escalera B, Espina A, García JR, Sosa-Arno JH, Nebra SA. Model-free Kinetics applied to sugarcane bagasse combustion. *ThermochimActa* 2006; 448(2): 111-16.
- [25] Reid RC, Prausnitz JM, Poling BE. The properties of gases and liquids. 4a ed. New York: MacGraw Hill; 1987.
- [26] Rogers JEL. Solid fuel combustion and its application to the incineration of solid refuse. PhD thesis. Cambridge, Massachusetts; Massachusetts Institute of Technology; 1973.
- [20] Shanmukharadhya KS. Simulation and thermal analysis of effect of fuel size on combustion in an industrial biomass furnace. *Energ Fuel* 2007; 21(4): 1895-00.

- [24] Van Kessel LBM, Arendsen ARJ, De Boer-Meulman PDM, Brem G. The effect of air preheating on the combustion of solid fuels on a grate. *Fuel* 2004 ; 83(9): 1123-31.
- [18] Werther J, Saenger M, Hartge EU, Ogada T, SiagiZ. Combustion of agricultural residues. *ProgEnerg Combust* 2000; 26 (1): 1-27.
- [16] Yang W, Ponzio A, Lucas C, Blasiak W. Performance analysis of a fixed-bed biomass gasifier using high-temperature air. *Fuel Process Technol* 2006; 87(3): 235-45.
- [10] Yang YB, Ryu C, Goodfellow J, Sharifi VN, Swithenbank J. Modeling waste combustion in grate Furnace. *Process Saf and Environ* 2004; 82 (3): 208-22.
- [8] Zhao W, Li Z, Zhao G, Zhang F, Zhu Q. Effect of air preheating and fuel moisture on combustion characteristics of corn straw in a fixed bed. *Energy Convers Manage* 2008; 49(12): 3560-65.
- [13] Zhou H, Jensen AD, Glarborg P, Jensen PA, Kavaliauscas A. Numerical modeling of straw combustion in a fixed bed. *Fuel* 2005; 84(4): 389-03.