

Caracterización energética y emisiones de una estufa de cocción ecoeficiente con biomasa a diferentes altitudes

Energy and emissions characterization of an eco-efficient biomass cook stove at different altitudes

Juan F. Pérez-Bayer, Diana S. Graciano-Bustamante, José A. Gómez-Betancur

Universidad de Antioquia. Grupo de manejo eficiente de la energía. Medellín. Colombia

Correo electrónico: juanpb@udea.edu.co

Recibido: 24 de enero de 2013

Aceptado: 3 de junio de 2013

Resumen

Cerca de 2500 millones de personas dependen de la leña como su principal combustible para calefacción y cocción. En este trabajo se estudia el efecto de la altitud (678 y 1976 metros sobre el nivel del mar, msnm) en el desempeño energético y las emisiones de una estufa de cocción eco-eficiente con biomasa. Los experimentos se llevaron a cabo bajo las pruebas de ebullición de agua y cocción controlada. El rendimiento disminuyó 24% al aumentar la altitud en la prueba de ebullición, y el consumo específico de combustible aumentó 27,3% debido a los cambios en la densidad del aire. En la prueba de cocción controlada, el consumo específico de combustible y las emisiones específicas aumentaron 15,3% y 16%, respectivamente. La altitud afectó significativamente el desempeño de la estufa tipo "Plancha", por lo que es necesario el rediseño de las estufas de acuerdo a su ubicación geográfica con el fin de optimizar el proceso de cocción.

Palabras claves: estufa de cocción eco-eficiente, biomasa, combustión, altitud, energía y emisiones, pruebas de desempeño WBT-CCT.

Abstract

Around 2.5 billion people depend on wood as their main fuel for heating and cooking. In this work is studied the effect of altitude (678 and 1976 meters above sea level) on energy performance and emissions of an improved wood stove under standardized cooking tests. The experiments were carried out under the Water Boiling (WBT) and Controlled Cooking (CCT) Tests. The efficiency decreased about 24% with increasing altitude in WBT, and specific fuel consumption increased 27.3% due to the air density changes. Regarding the controlled cooking test, the specific fuel consumption and specific emissions increased by 15.3% and 16%, respectively. It is highlighted that altitude significantly affects the "Plancha" wood stove behavior. Specific emissions increased at higher altitudes, so it is necessary to redesign wood stoves according to their geographical location in order to optimize the cooking process.

Key words: eco-efficient cook stove, biomass, combustion, altitude, energy and emissions, WBT-CCT cooking tests.

Introducción

Según la Agencia Internacional de Energía (IEA), cerca de 2500 millones de personas dependen de la leña como su principal combustible para calefacción y cocción de alimentos, cuya población puede aumentar a 2700 millones en el año 2030 [1]. En Colombia el 10% de la población depende de la leña, es común que los campesinos colombianos utilicen el fogón de leña a campo abierto para cocinar sus alimentos debido al bajo poder adquisitivo del sector rural. En los fogones a campo abierto (tres piedras) los gases producto de la combustión como el monóxido de carbono, alquitranes y material particulado son manejados de forma inadecuada, siendo nocivos para el medio ambiente y la salud humana, en especial para mujeres, niños y ancianos.

Según la Organización Mundial de la Salud, cerca del 5% de la mortalidad y la morbilidad a nivel global se debe a la contaminación del aire en espacios cerrados. Tal contaminación es responsable de 1,2 millones de muertes anuales en el mundo, por lo que el uso de combustibles sólidos es una de las diez amenazas más importantes para la salud pública mundial sino se manejan de forma sostenible y eficiente (<http://www.who.int>).

Debido al uso masivo de la leña para cocción en las zonas rurales de Colombia, la Gobernación de Antioquia, a través de la corporación autónoma *Cornare* implementó el proyecto “Huellas”. Este proyecto entrega estufas eficientes y huertos leñeros a los campesinos, el cual a finales de 2011 había beneficiado 14000 familias. Los huertos son un área sembrada de árboles maderables aptos para leña que evitan la deforestación de los bosques, facilitan el acceso al combustible biomásico y generan ahorro de energía eléctrica y gas (<http://www.cocorna-antioquia.gov.co>).

Buscando mejorar las condiciones de vida de las poblaciones menos favorecidas se han desarrollado diversos estudios con el objetivo de optimizar el desempeño energético y/o ambiental (emisiones) de las estufas de leña. *Mukunda et al.* [2] diseñaron estufas eficientes de biomasa, las cuales fueron evaluadas por medio de pruebas WBT. La eficiencia de las estufas varió entre 25 % y 35 % bajo la prueba de ebullición de agua (WBT). *Berrueta et al.* [3] analizaron y compararon el desempeño de una estufa eficiente (Patsari) con respecto a estufas tradicionales de fuego abierto (tres piedras y tipo U), llevando a cabo pruebas WBT y cocción controlada (CCT). La estufa Patsari presentó claras ventajas con respecto a las cocinas tradicionales, con una reducción del consumo de energía del 67% y ahorro de combustible del 44%. *Boy et al.* [4] estudiaron una estufa diseñada, construida y utilizada en Guatemala “tipo Plancha”. Evaluaron el efecto de diferentes diseños de la cámara de combustión bajo la prueba WBT. Con la modificación de la cámara de combustión, la eficiencia térmica global aumento 12% con respecto a la estufa de fuego abierto. *Bailis et al.* [5] realizaron estudios en Estados Unidos, India, y México, comparando el rendimiento de una estufa eficiente Patsari y una estufa tradicional de fuego abierto bajo pruebas WBT. El desempeño energético de la estufa Patsari presentó una disminución del consumo de combustible entre 19 % y 67 % con respecto a la estufa tradicional de fuego abierto.

Smith et al. [6] usaron técnicas estandarizadas para el seguimiento de estufas mejoradas en India y México mediante la prueba WBT. Evaluaron los cambios en la calidad del aire interior y el consumo de combustible. Obtuvieron reducción de los niveles de monóxido de carbono entre 30-70 %, las concentraciones de partículas disminuyeron entre 25 % y 65 %, y el consumo de combustible se redujo entre 20 % y 67 %. *MacCarthy et al.* [7] analizaron estufas tipo cohete, gasificación y tiro forzado por ventilador con relación a una estufa tradicional y a la estufa tres piedras. Los diseños mejorados, en especial la de tiro forzado, demostraron un mejor aprovechamiento energético del combustible y menores emisiones contaminantes bajo protocolos WBT. *Panwar et al.* [8] diseñaron y analizaron una estufa basada en gasificación de biomasa con el fin de reducir el consumo de combustible, aumentar el calor transferido al proceso y reducir emisiones. *Jetter et al.* [9] caracterizaron 10 estufas diferentes y se analizaron comparativamente con el fogón de tres piedras. Los más eficientes resultaron ser los que orientaban mejor el fuego, y estaban mejor aisladas.

Adkins et al. [10, 11] analizaron estufas mejoradas con relación a una estufa tradicional de tres piedras bajo pruebas CCT modificadas. El uso de las estufas eficientes evitó alrededor de 9 toneladas de emisiones de CO₂ por año, y redujo el consumo de leña entre 22% y 46% en comparación con la estufa tradicional de tres piedras. *MacCarty et al.* [7], evaluaron el desempeño energético y ambiental de 50 diseños diferentes de estufas (tipo “Cohete” y de tiro forzado) mediante la prueba WBT con respecto a la estufa tradicional. Las estufas tipo “Cohete” redujeron el consumo de combustible en un 33%, las emisiones de monóxido de carbono en 75% y las emisiones de material particulado en 46% en comparación con las estufas de tres piedras. Además, las estufas de tiro forzado mostraron una reducción del consumo de combustible del 40% y las emisiones disminuyeron 90% en comparación con la estufa de tres piedras.

Con respecto a las emisiones contaminantes, *Wang et al.* [12] analizaron los gases contaminantes, incluidos los compuestos orgánicos volátiles (COV), provenientes de la combustión de biomasa en las cocinas mejoradas en zonas rurales de China. Se evaluaron cinco biocombustibles y dos tipos de estufa (*Kang* y tradicional). La estufa eficiente *Kang* generó menores emisiones contaminantes, ya que las relaciones CO/CO₂ disminuyeron entre 22% y 32% con respecto a la estufa tradicional.

Con base en la literatura científica consultada es posible afirmar que las estufas mejoradas poseen mayor rendimiento y menores emisiones con respecto a la estufa tradicional tres piedras. Dado que no se han encontrado estudios del efecto de la altitud en el desempeño energético y emisiones de las estufas de cocción que utilizan biomasa como combustible, el objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de la altura sobre el nivel del mar en el desempeño energético y emisiones contaminantes específicas de una estufa mejorada. La estufa objeto de estudio, bajo protocolos WBT y CCT, es la tipo Plancha, por su amplia difusión en América Latina y recientemente en Colombia. Adicionalmente este trabajo constituye una metodología experimental para la evaluación de nuevos diseños y/o modificaciones a las estufas de cocción *in situ*, cuyos estudios del efecto de la altitud y método de trabajo no se han encontrado en la literatura consultada.

Materiales y Métodos

Estufa eco-eficiente de biomasa

La estufa utilizada en el proyecto “Huellas” es del tipo “Plancha” con mejoras. Esta estufa es un modelo diseñado y construido en Guatemala desde hace 20 años. Sus principales mejoras son la chimenea y la cámara de combustión. Ésta ha sido muy popular en la población por su bajo costo y alta durabilidad [4]. Las dimensiones de las estufas implementadas en Colombia son de 100 cm x 75 cm x 90 cm de alto, y se caracterizan principalmente por contar con una chimenea para los gases de combustión, cuatro puestos en fundición con platos y anillos removibles que permiten graduar la abertura según el tamaño de la olla, una escotilla para regular la entrada de aire, y un caldero que aprovecha la energía térmica de los gases de escape para calentar agua. En la figura 1 se presenta un imagen de la estufa, cuyo soporte está construido con arena, cemento y ladrillos (<http://www.cocorna-antioquia.gov.co>).

En la medición de las variables obtenidas de forma directa, tales como el peso, la temperatura y el tiempo, se utilizaron los siguientes instrumentos: balanza digital de 4000 g ± 0,1 g; termopares tipo K con ± 1 °C, y un analizador de gases AVL Digas 4000, el cual mide la concentración de monóxido de carbono (CO, %vol), bióxido de carbono (CO₂, %vol), oxígeno (O₂, %vol), hidrocarburos sin quemar (hidrocarburos totales, THC) en base hexano (C₆H₁₄, ppm), y óxidos de nitrógeno (NO_x, ppm).



Fig. 1. Estufa ecoeficiente de leña tipo Plancha

Protocolos de caracterización de estufas de leña

La caracterización de las estufas en función de la altitud se realizó bajo dos pruebas estandarizadas. La prueba de ebullición de agua (WBT por sus siglas en inglés) versión 3.0 (multi-olla), mide el tiempo y combustible necesario para llevar al punto de ebullición una cierta cantidad de agua en condiciones controladas [13]. Este análisis se plantea en las fases de diseño de las estufas, por lo que puede no reflejar las condiciones reales de trabajo de la estufa en las comunidades. Por esto la segunda prueba fue la de cocción controlada (CCT) versión 2.0 (multi-olla), ya que el desempeño de esta prueba se asocia a la práctica real bajo tareas específicas de cocción. Sin embargo, es difícil hacer comparaciones entre regiones que tengan diferentes culturas o preparen diferentes alimentos [14].

Prueba de ebullición de agua (WBT)

La prueba de agua en ebullición (WBT) simula el proceso de cocción y apoya la toma de decisiones de los diseñadores de las estufas, ya que permite entender cómo y en qué medida se transfiere la energía desde el combustible a la olla. La prueba está conformada por tres componentes: WBT (frío), en el cual la estufa se enciende al iniciar el día; WBT (caliente), la estufa se encuentra precalentada, y WBT (a fuego lento), en el cual se trata de simular un proceso de cocción. Ésta prueba se puede realizar ocupando todos los puestos que posee la estufa, con el fin de realizar un análisis más efectivo. Las ventajas de la prueba WBT incluyen la simplicidad de su realización y la repetibilidad [13]. Los parámetros evaluados por la prueba WBT son la eficiencia térmica (h , %) y el consumo específico de combustible (SC_{WBT} , kg_{madera}/l_{agua}). La eficiencia térmica es una relación entre la tarea de ebullición y evaporación del agua con la energía suministrada por la combustión de la madera [3], ver ecuación 1.

$$h = \frac{4.186 \cdot \sum_{j=1}^n (P_{j,f}) \cdot (T_{j,f} - T_{j,i}) + 2260 \cdot \sum_{j=1}^n (P_{j,i} - P_{j,f})}{f_d \cdot PCI_{madera}} \quad (1)$$

Dónde i : inicial, inicio de la prueba; f : final de la prueba, cuando una olla alcanza la temperatura de ebullición; n es el número de ollas usadas en la prueba multiolla (en este trabajo se usaron 4 ollas); $P_{j,f}$ en gramos, es la masa de agua al final de la prueba en cada olla (g); $4186 \text{ J/g } ^\circ\text{C}$, es el calor específico del agua; $T_{j,f} - T_{j,i}$ en $^\circ\text{C}$, es el cambio de la temperatura en cada olla en la prueba; $P_{j,i} - P_{j,f}$ en gramos, es la cantidad de agua evaporada durante la prueba en cada olla; 2260 J/g , es el calor latente de evaporación del agua entre 95°C y 100°C [15]; f_d en gramos, es el combustible seco equivalente consumido y PCI_{madera} J/g , es el poder calorífico inferior del combustible.

El consumo específico de combustible de la prueba de ebullición de agua (SC_{WBT} , g_{madera}/l_{agua}) es la relación entre el combustible consumido y la cantidad de agua hervida durante la prueba, ver ecuación 2. En este caso el consumo específico de combustible se refiere a la medida de la cantidad de madera necesaria para producir 1 litro de agua hervida. Donde ρ_{agua} es la densidad del agua en g/l ; $m_{j,hervida}$ es la masa de agua hervida en la prueba (gramos).

$$SC_{WBT} = \frac{f_d \cdot \rho_{agua}}{\sum_{j=1}^n (m_{j,hervida})} \quad (2)$$

Prueba de cocción controlada (CCT)

La prueba de cocción controlada (CCT) está diseñada para evaluar el desempeño de las estufas eficientes con respecto a las estufas comunes o tradicionales. Las estufas se comparan a medida que realizan una tarea estandarizada de cocción semejante a las condiciones de cocción típicas de la población local [14]. Esta prueba ofrece una amplia gama de indicadores de desempeño energético, tales como el consumo específico de combustible (SC_{CCT} , $g_{madera}/kg_{alimento}$), la energía específica (E_{CCT} , $\text{kJ}/kg_{alimento}$) y el tiempo utilizado en la tarea de cocción (Δt , min). El SC_{CCT} representa la cantidad de combustible requerido por la estufa para producir una unidad de masa de alimentos cocidos, se calcula mediante la ecuación 3. Donde f_d (g) es el combustible consumido en base seca y W_f (kg) es el peso total de los alimentos cocidos [3]. La energía específica, E_{CCT} , evalúa la cantidad de energía requerida por la estufa de cocción para producir una unidad de masa de alimentos cocidos. Ver ecuación 4.

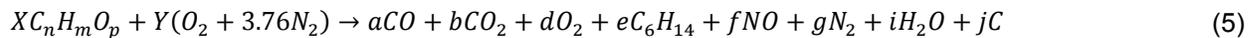
$$SC_{CCT} = \frac{f_d}{W_f} \quad (3)$$

$$E_{CCT} = \frac{f_d \cdot PCI_{madera}}{1000 \cdot W_f} \quad (4)$$

Emisiones contaminantes

Existe un gran número de comunidades que utilizan la leña en fogones abiertos, los cuales generan un menor aprovechamiento de la energía y por ende generan una mayor emisión de contaminantes atmosféricos (gases y material particulado) que son nocivos para el ambiente y para quienes usan las estufas. Dada la importancia y la atención mundial que ocupa el Cambio Climático, las emisiones de gases contaminantes por unidad de producto constituyen un indicador para evaluar económica, social y ambientalmente los procesos energéticos [15], en este caso la cocción de alimentos con biomasa. En esta sección se plantea el método de cálculo para determinar las emisiones específicas, dadas en gramos de cada especie gaseosa por kilogramo de alimento ($g_{gas,i}/kg_{alimento}$). Esta forma de reportar emisiones es común en otros sistemas energéticos, pero no se ha usado en estufas de cocción bajo protocolos CCT, se usa porque se considera una contribución a la caracterización *in situ* de estufas de cocción.

Con la concentración de los gases medidos en estado estable con el analizador de gases y el carbón residual en el cenicero, se lleva a cabo el balance de masa de la combustión real de la biomasa presente en el proceso de cocción, ver ecuación 5.



Este balance de masa permite determinar las emisiones específicas (SE_i , $g_{gas,i}/kg_{madera}$) a partir de la ecuación 6 para cada una de las especies gaseosas contaminantes. Este modelo fue adaptado de MacCarty *et al.* [7], quienes lo describen sólo para emisiones de CO_2 en pruebas WBT.

$$SE_i = \frac{n_{gas,i}}{n_{madera}} \cdot \frac{M_{gas,i}}{M_{madera}}, \text{ Donde } i = CO, CO_2, C_6H_{14}, NO \quad (6)$$

Donde SE_i es la emisión específica de cada componente gaseoso de la mezcla de gases de combustión, en gramos de la especie gaseosa por kilogramo de combustible consumido ($g_{gas,i}/kg_{madera}$); $n_{gas,i}$ es el número de moles de cada especie gaseosa (mol), n_{madera} es el número de moles del combustible (mol), $M_{gas,i}$ es el peso molecular de cada especie gaseosa ($g_i/kmol_i$), y M_{madera} es el peso molecular del combustible ($kg/kmol$). Con las emisiones específicas de cada especie y el consumo específico de combustible se determinan las emisiones específicas de cada especie gaseosa asociadas al proceso de cocción, dadas en gramos de cada gas contaminante por kilogramo de alimentos preparados, $SEC_{CCT,i}$ en $g_i/kg_{alimento}$, ver ecuación 7.

$$SEC_{CCT,i} = SE_i \cdot \frac{SC_{CCT}}{1000}, \text{ Donde } i = CO, CO_2, C_6H_{14}, NO \quad (7)$$

La medición de las especies gaseosas durante la prueba CCT en estado estacionario se llevó a cabo después de 30 minutos de iniciado el proceso de cocción. Se midieron bióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), oxígeno (O_2), hidrocarburos sin quemar THC base hexano (C_6H_{14}) y óxidos de nitrógeno (NO_x), especies típicas de la combustión de la biomasa en procesos de cocción [7]. Se realizan 5 mediciones de los gases por prueba y las emisiones específicas se determinan con el valor promedio de cada especie.

Diseño experimental

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en los municipios de El Peñol y Sopetrán (Antioquia – Colombia) localizadas a 1976 y 678 msnm, respectivamente. La densidad del aire a 1976 msnm es 12,14% menor respecto al lugar a 678 msnm. Se realizaron pruebas WBT y CCT, más medición de emisiones contaminantes en estado estable, con el fin de cuantificar diferentes parámetros como la eficiencia, consumo específico de combustible, el tiempo de cocción y las emisiones específicas asociadas a procesos de cocción con biomasa.

El combustible empleado para la realización de estas pruebas fue madera de *PinoPátula* ($CH_{1.573}O_{0.501}N_{0.013}S_0$, $PCI_{bms, base\ seca}=19,15$ MJ/kg). Tanto la forma y tamaño del combustible (1 cm x 11 cm x 40 cm), así como su contenido de humedad se mantuvieron constantes durante todas las pruebas, con el fin de aislar efectos en el desempeño de la estufa debido a estos dos parámetros. El análisis elemental de la biomasa (%wt, seco sin ceniza) es: C 48,41; H 6,11; O 45,48; y el análisis próximo (% wt) es: carbón fijo 12,33; materia volátil 74,9; humedad 12,14 y cenizas 0,63.

El efecto de la altitud se analizó mediante dos diseños estadísticos de experimentos. El primero, un diseño multifactorial 2^2 con una réplica, cuyos factores fueron el tipo de prueba (WBT arranque en frío y en caliente) y la altitud (678 y 1976 msnm). El segundo, un diseño experimental de un solo factor donde se evalúa el efecto de la altitud (678 y 1976 msnm) en la prueba CCT con una réplica mediante análisis de varianza.

Cada experimento se realiza en días diferentes con la siguiente secuencia: Se inicia con la prueba WBT (en frío), luego prueba CCT, y por último la prueba WBT (caliente). La prueba WBT (a fuego lento) fue omitida debido a que no se consideró necesaria, ya que se contaba con la prueba CCT, la cual se asemeja a las condiciones típicas de uso de la estufa [14].

Las pruebas tuvieron la misma hora de inicio durante los 4 días. La prueba WBT se realizó bajo el protocolo multi-olla (4 ollas), las cuales contenían entre 2-4 litros, según su capacidad. La prueba CCT se llevó a cabo con la preparación de un plato típico de la región de Antioquia, llamado "*Sancocho de pollo*", el cual es una sopa compuesta por alimentos como pollo, papa, yuca y condimentos. Para la bebida se preparó infusión de azúcar de caña (conocida en Colombia como *aguapanela*), y para acompañar el plato se prepararon tortas de maíz (arepas) y arroz.

Resultados y Análisis

Prueba de ebullición de agua (WBT)

En las figuras 2a y 2b se presentan los resultados obtenidos de las pruebas WBT en frío y WBT en caliente, realizadas en ambos niveles de altitud. Los valores obtenidos de la eficiencia bajo el protocolo WBT son similares a los reportados en otros trabajos [3, 4]. Analizando la prueba WBT en frío, se observa que a mayor altitud la eficiencia térmica disminuye un 24% con respecto al resultado a 678 msnm (Figura 2a). Esto se debe principalmente a la variación en la densidad del aire, causando que la estufa que se encuentra a mayor altitud cuente con menor disponibilidad de oxígeno (concentración másica), aspecto que reduce la eficiencia de la combustión, y con ello disminuye el rendimiento energético del proceso.

También se observa en la Figura 2a como el consumo específico de combustible incrementa en un 27,3% a mayor altitud. Esto indica que se consume más cantidad de combustible para realizar la misma labor sin importar que la temperatura de ebullición disminuya a mayor altitud por menor presión atmosférica. Por tanto, a menor temperatura de ebullición con el aumento de la altitud, las tareas de cocción requieren más tiempo porque el sistema está a menor temperatura, derivando un incremento en el consumo de combustible [15].

Un comportamiento similar se aprecia en la prueba WBT en caliente (Figura 2b); este comportamiento está directamente relacionado con la disminución de la eficiencia a causa de una menor disponibilidad de oxígeno con el aumento de la altitud y mayores tiempos para realizar la tarea, por la menor temperatura del sistema.

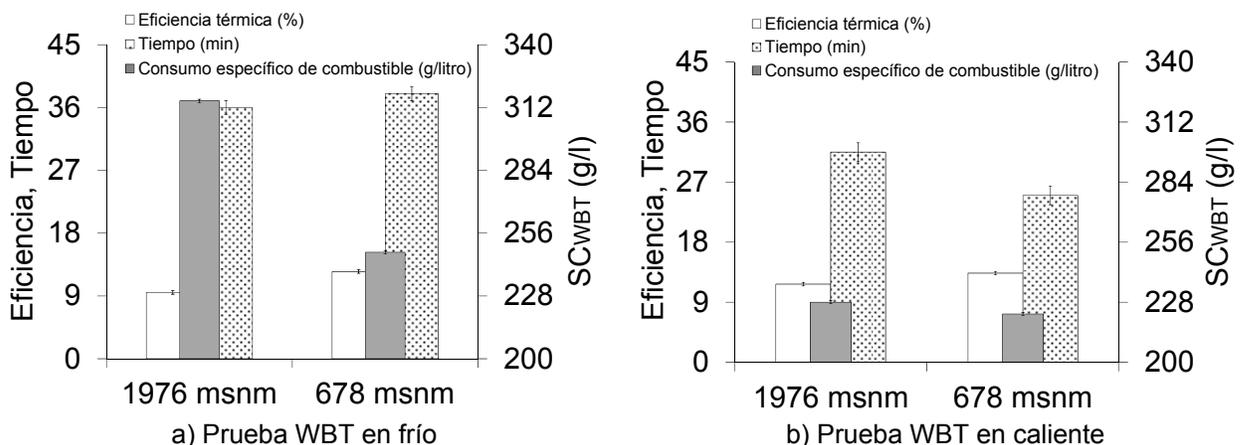


Fig. 2. Caracterización energética de la estufa tipo plancha mediante la prueba WBT

Comparando las pruebas WBT en caliente con respecto a la prueba WBT en frío (ver Figuras 2a y b), se puede observar una reducción en el consumo específico de combustible del 27,6% para 1976 msnm y del 10% para 678 msnm. La eficiencia aumenta un 23,2% (1976 msnm) y 6,8% (678 msnm). La principal causa de este comportamiento se debe a que la estufa en caliente ha vencido la inercia térmica alcanzando el estado estacionario. Esto destaca la importancia del aislamiento térmico de la estufa, con el fin de que su estructura no pierda el calor almacenado y se evite en lo posible tener que encenderla en frío varias veces al día. Tal aspecto es más relevante en las zonas que se encuentran a mayor altitud por el mayor consumo de combustible, y por tanto la menor eficiencia.

El tiempo de duración de la prueba WBT en caliente disminuye entre 12,5% y 34%, respecto a la prueba WBT en frío (Fig. 2a y 2b). Este fenómeno se debe a que la estufa ha alcanzado su estado térmico estable y por lo tanto el calor generado es mejor aprovechado por el proceso de ebullición de agua disminuyendo la pérdida de calor hacia los alrededores.

El tiempo de las pruebas a menor altitud se redujo en promedio 21% con respecto al lugar de mayor altitud. Esto se debe a la disponibilidad de oxígeno, lo cual incrementa la masa de gases y mejora la transferencia de calor entre la zona de combustión y el proceso de ebullición. Además, la mayor temperatura de ebullición del agua a 678 msnm lleva a una mayor temperatura de operación del sistema, reduciendo así el tiempo requerido para desarrollar las tareas de cocción [15].

Según el análisis estadístico del diseño de experimentos (2^2) mediante el análisis de varianza, se obtiene que los factores estudiados, altura sobre el nivel del mar y tipo de prueba WBT (arranques en caliente y en frío) son variables estadísticamente significativas en los parámetros de respuesta, tales como: eficiencia y consumo específico de combustible, ya que presentan un valor-P <0,005.

El análisis estadístico del diseño experimental se resume en el diagrama de Pareto (Fig. 3). Se observa como a medida que aumenta la altura sobre el nivel del mar, la eficiencia de las pruebas WBT disminuye y el consumo específico de combustible aumenta debido a la relación inversa entre estos dos parámetros de desempeño energético. Esto se debe a la disminución de la densidad del aire con la altura, lo cual afecta la eficiencia del proceso de combustión. Cuando se pasa de la prueba en frío a la prueba de arranque en caliente bajo el protocolo WBT, disminuye el consumo específico de combustible y por tanto aumenta la eficiencia, debido a que se aprovecha mejor el calor generado en la combustión para el proceso de ebullición.

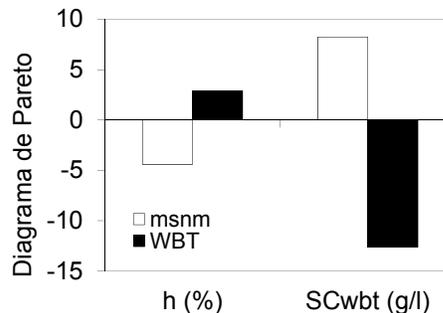


Fig. 3. Diagrama de Pareto: efecto de la altura sobre el nivel del mar (678 y 1976 msnm) y el tipo de prueba WBT (arranques en frío y caliente) en la caracterización energética de la estufa de leña tipo plancha

Prueba de cocción controlada (CCT)

La figura 4 muestra los parámetros energéticos de la prueba CCT en los dos sitios de ensayo. Esta prueba se aproxima a las verdaderas condiciones de operación de la estufa. El análisis estadístico del experimento se lleva a cabo para un solo factor, la altura sobre el nivel del mar. El análisis de varianza arroja que hay efectos estadísticamente significativos del factor (altitud, msnm) sobre los parámetros que caracterizan la prueba CCT (Valor-P < 0,005) con un 95% de confianza.

En la figura 4 se muestra que el consumo específico de combustible, la energía específica y el tiempo de cocción aumentan a mayor altitud. Esto verifica los resultados obtenidos en la prueba WBT con la altitud. La prueba CCT indica que el consumo específico de combustible y la energía específica aumentan en un 15,3% a 1976 msnm con respecto al desempeño a 678 msnm de altitud.

La prueba también determina que el tiempo de cocción disminuye a menor altitud en un 38,7%; estos resultados eran los esperados, ya que los datos que había arrojado la prueba WBT indicaban que la estufa situada a menor altitud tiene mejor desempeño. Otro resultado importante obtenido en la prueba CCT indica que el consumo específico de combustible es mayor que en la prueba WBT, esto se debe a la necesidad de mayor cantidad de combustible consumido en la preparación de alimentos que en la ebullición de agua. Datos

similares obtuvo Berrueta *et al.* [3], quienes reportan consumos específicos de combustible en estufas eficientes alrededor de 640 g_{madera}/kg_{alimento}.

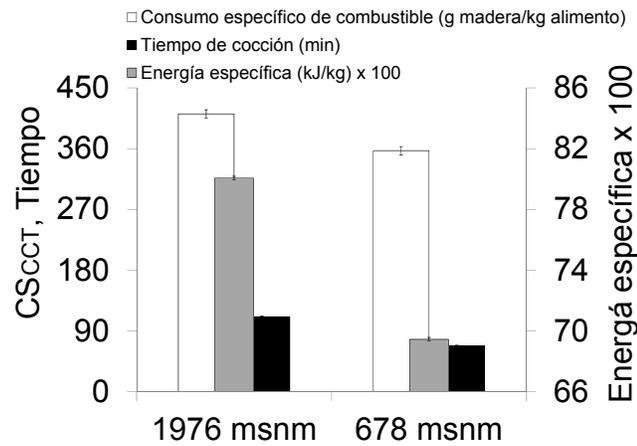


Fig. 4. Resultados prueba CCT

El mejor desempeño energético a menor altitud se debe a la mayor densidad del aire, y por tanto a la mayor concentración másica de oxígeno, así como a la menor pérdida de calor al entorno. Este aspecto favorece la combustión y con ello aumenta el rendimiento del proceso de cocción. Adicionalmente, la mayor temperatura de ebullición del agua a menor altitud deriva una mayor temperatura en el sistema, favoreciendo la disminución del consumo de combustible e incrementando la eficiencia.

Emisiones

Los resultados de las emisiones contaminantes de cada experimento a diferentes altitudes no son totalmente comparables, ya que la relación aire/combustible de cada prueba no es la misma, esto se debe al tiro natural con que operan las estufas mejoradas por lo que no es posible tener un control directo sobre dicha variable (relación aire-combustible). Sin embargo, la comparación de las tendencias permite sustentar las conclusiones derivadas en la prueba CCT.

En la tabla 1 se presentan las concentraciones de las emisiones contaminantes de la estufa en las pruebas CCT en régimen térmico estacionario. Estos resultados describen los principales gases y son la base para estimar las emisiones específicas con respecto al alimento cocido. Las emisiones específicas ofrecen una visión global de cómo se lleva a cabo el proceso de cocción y su efecto medio ambiental por las emisiones contaminantes asociadas al uso de biomasa en la estufa. En la tabla 1 se evidencia la presencia de oxígeno en los gases en ambas altitudes, indicando que la combustión se realizó con exceso de aire.

Tabla 1. Composición de emisiones y desviación estándar

Especie (%vol)	678 msnm	1976 msnm
	Promedio (± Desv. std)	Promedio (± Desv. std)
CO	0,15 (0,04)	0,13 (0,08)
CO ₂	9,65 (1,65)	8,80 (3,96)
O ₂	9,43 (2,4)	11,4 (4,31)
THC (ppm)	5,85 (0,64)	6,30 (2,80)
NO _x (ppm)	74,0 (0,0027)	77,0 (0,0037)

En la figura 5 se muestra que las emisiones específicas aumentan con la altitud. Las emisiones específicas de CO, CO₂, THC y NO_x aumentan en 6,5%, 15%, 23% y 30% respectivamente, debido al mayor tiempo de cocción y consumo de combustible con la altitud por la menor temperatura del sistema, esto se debe a la menor temperatura de ebullición del agua a menor presión atmosférica [15]. Por tanto, es posible afirmar que se presenta un mayor impacto ambiental al cocinar a mayores altitudes por las menores temperaturas de operación del sistema. Dado que a mayor altitud aumenta la concentración de emisiones contaminantes, se

considera que dicha estufa mejorada genera un mayor impacto ambiental en la zona a 1976 msnm comparado con el impacto a 678 msnm.

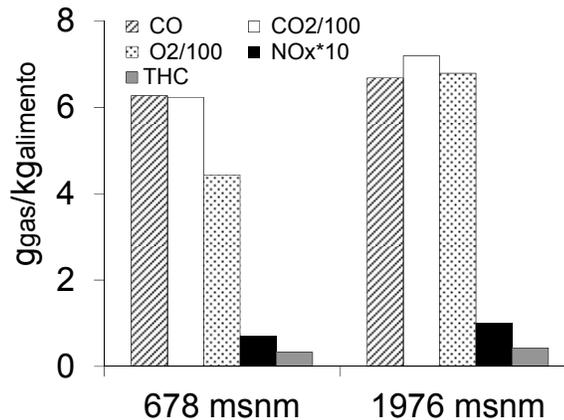


Fig. 5. Emisiones específicas bajo prueba CCT

Error experimental

La propagación de la incertidumbre experimental de los principales parámetros característicos en las pruebas WBT y CCT se presentan en la tabla 2. Dicha propagación del error se calcula mediante el modelo de la ecuaciones 8 y 9, el cual relaciona la resolución de medida experimental de la instrumentación utilizada en este trabajo.

$$F = f(x_1, x_2, x_3, \dots x_n) \tag{8}$$

$$\Delta F = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial F}{\partial x_i} \right| * \Delta x_i \tag{9}$$

Tabla 2. Incertidumbre experimental de los parámetros de desempeño energético de la estufa eco-eficiente bajo pruebas WBT y CCT

Parámetro	Error experimental (±)
WBT: Eficiencia (%)	0,27
WBT: Consumo específico de combustible (g/l)	0,77
CCT: Tiempo de cocción (min)	0,01
CCT: Energía específica (kJ/kg)	12,23
CCT: Consumo específico de combustible (g _{madera} /kg _{alimento})	0,61

Conclusiones

- 1- Se observó que la altura sobre el nivel del mar es un parámetro estadísticamente significativo en el desempeño de la estufa eco-eficiente. La estufa mejora su rendimiento entre 6,8% – 23,2%, cuando se pasa WBT arranque en frío a WBT arranque en caliente, siendo más significativa la mejora a menor altura. Esto se debe a la disminución de las pérdidas de calor y con ello, el mejor aprovechamiento de la energía suministrada por el combustible en el proceso de cocción.
- 2- El efecto de la altitud en el desempeño energético de la estufa tipo Plancha bajo la prueba WBT, es estadísticamente importante con una confiabilidad del 95%. A mayor altitud aumenta el consumo específico de combustible, y por tanto disminuye la eficiencia. Esto se debe al cambio de la temperatura de ebullición del agua con la altitud. Por tanto, la temperatura del sistema será menor, lo que incrementa el tiempo para desarrollar las tareas de ebullición del agua, con el consecuente incremento del consumo de combustible. Dicho efecto de la altitud también es válido para la caracterización energética bajo la prueba CCT.

- 3- Las emisiones específicas de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos sin quemar (THC), bióxido de carbono (CO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x) aumentan a mayor altitud (de 678 a 1976 msnm). Las emisiones de CO, THC, CO₂ y NO_x aumentan en 6,5%, 30%, 15,4%, y 43%, respectivamente a 1976 msnm con respecto a las pruebas a 678 msnm, por tanto se concluye que a mayor altura aumenta el daño al medio ambiente.
- 4- Es necesario ajustar y rediseñar la estufa para alcanzar mejores rendimientos y así tener un óptimo aprovechamiento de la biomasa para tareas de cocción en función de la ubicación geográfica de estos equipos. El rediseño puede estar direccionado inicialmente a la dimensión de la cámara de combustión, chimenea y la parrilla de la estufa, con el fin de reducir tiempos de cocción mejorando la eficiencia y disminuyendo las emisiones contaminantes asociadas al proceso de combustión.
- 5- La optimización de las estufas (reducción de emisiones contaminantes) mejora la calidad de vida y la economía de la población campesina, a la vez que se mitigan los impactos medioambientales por procesos de cocción con biomasa. Disminuir la inhalación de CO reduce enfermedades respiratorias, fatiga, dolor de cabeza e incluso la muerte por envenenamiento en la población vulnerable (mujeres, niños y ancianos) al interior de las viviendas. Se mitigan los impactos ambientales globales como el calentamiento global producido por CO₂, NO_x; así como efectos locales como *smog* fotoquímico por la reducción de emisiones de THC.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Universidad de Antioquia a través del proyecto "Sostenibilidad 2012-2013". De igual manera agradecen el apoyo en las pruebas experimentales a Ligia Monsalve, Estela Vargas, Clara Bustamante, Edgar Graciano y Leticia Betancur.

Referencias

1. Agencia Internacional de Energía (IEA). "World Energy Outlook 2006". [Consultado: 10 de febrero de 2012]. Disponible en: <http://www.worldenergyoutlook.org>.
2. Mukunda, H. S., Shrinivasa, U. y Dasappa, S. "Portable single pan wood stoves of high efficiency for domestic use", *Sadhana*. 1988, vol. 13, n° 4, p. 237-270. [Consultado: 20 de febrero de 2012]. Disponible en: <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF02759888>. ISSN 10.1007/BF02759888. DOI 0256-2499.
3. Berrueta, V. M., Edwards, R. D. y Masera, O. R. "Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico". *Renewable Energy*. 2008, vol. 33, n° 5, p. 859-870. [Consultado: 20 de febrero de 2012]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148107001371>. ISSN 0960-1481. DOI 10.1016/j.renene.2007.04.016.
4. Boy, E., Bruce, N. y Smith, K. R. "Fuel efficiency of an improved wood-burning stove in rural Guatemala: implications for health, environment and development". *Energy for Sustainable Development*. 2000, vol. 4, n° 2, p. 23-31. [Consultado: 22 de Febrero de 2012]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082608602392>. ISSN 0973-0826. DOI 10.1016/j.bbr.2011.03.031.
5. Bailis, R., Berrueta, V., Chengappa, C. "Performance testing for monitoring improved biomass stove interventions: experiences of the Household Energy and Health Project". *Energy for Sustainable Development*. 2007, vol. 11, N° 2, p. 57-70. [Consultado: 22 de febrero de 2012]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082608604007>. ISSN 0973-0826. DOI 10.1016/S0973-0826(08)60400-7.
6. Smith, K. R., Dutta, K. y Chengappa, C. "Monitoring and evaluation of improved biomass cookstove programs for indoor air quality and stove performance: conclusions from the Household Energy and Health Project". *Energy for Sustainable Development*. 2007, vol. 11, n° 2, p. 5-18. [Consultado: 22 de febrero de 2012]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082608603968>. ISSN 0973-0826. DOI: 10.1016/S0973-0826(08)60396-8.
7. MacCarty, N., Ogle, D. y Still, D. "A laboratory comparison of the global warming impact of five major types of biomass cooking stoves". *Energy for Sustainable Development*. 2008, vol. 12, N° 2, p. 56-65. [Consultado: 25 de febrero de 2012]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082608604299>. ISSN: 0973-0826. DOI: 10.1016/S0973-0826(08)60429-9.

8. Rathore, N. S. y Panwar, N. L. "Design and performance evaluation of a 5kW producer gas stove". *Biomass and Bioenergy*. 2008, vol. 32, n° 12, p. 1349-1352. [Consultado: 25 de febrero de 2012]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953408000901>. ISSN 0961-9534. DOI: 10.1016/j.bbr.2011.03.031.
9. Jetter, J.J., Kariher, P. "Solid-fuel household cook stoves: Characterization of performance and emissions". *Biomass and Bioenergy*. 2009, vol. 33, n° 2, p. 294-305. [Consultado: 25 de febrero de 2012]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953408001505>. ISSN 0961-9534. DOI 10.1016/j.biombioe.2008.05.014.
10. Adkins, E., Chen, J. y Winiecki, J. "Testing institutional biomass cookstoves in rural Kenyan schools for the Millennium Villages Project". *Energy for Sustainable Development*. 2010, vol. 14, n° 3, p. 186-193. [Consultado: 01 de marzo de 2012]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082610000335>. ISSN 0973-0826. DOI 10.1016/j.esd.2010.07.002.
11. Adkins, E., Tyler, E., Wang, J. "Field testing and survey evaluation of household biomass cook stoves in rural sub-Saharan Africa". *Energy for Sustainable Development*. 2010, vol. 14, n° 3, p. 172-185. [Consultado: 01 de marzo de 2012]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082610000347>. ISSN 0973-0826. DOI: 10.1016/j.esd.2010.06.002.
12. Wang, S., Wei, W. y Du, L. "Characteristics of gaseous pollutants from biofuel-stoves in rural China". *Atmospheric Environment*. 2009, vol. 43, N° 27, p. 4148-4154. [Consultado: 01 de marzo de 2012]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231009004804>. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/j.atmosenv.2009.05.040.
13. Bailis, R., Ogle, D. y MacCarty, N. "The Water Boiling Test (WBT)". 2009. Household Energy and Health Programme, Shell Foundation. [Consultado: 4 de marzo de 2012]. Disponible en: http://www.ehs.sph.berkeley.edu/hem/content/WBT_Version_3.0_Jan2007a.pdf.
14. Bailis, R., Ogle, D. y MacCarty, N. "Controlled Cooking Test (CCT)". 2009. Household Energy and Health Programme, Shell Foundation. [Consultado: 10 de marzo de 2012]. Disponible en: http://www.ehs.sph.berkeley.edu/hem/content/CCT_Version_2.0_with_appendix5_Aug2004a.pdf.
15. Cengel, Y. A. y Boles, M. A. *Termodinámica*. 7ed. México DF: McGraw-Hill. 2012, p. 111-165. ISBN 978-607-15-0743-3.