

## ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE LA COMBUSTIÓN DE BIOGÁS EN UN QUEMADOR BOLIVIANO

### Analysis of biogas combustion efficiency for domestic stove use in Bolivia

Gabriela Katherine Jiménez Lira<sup>1</sup>

#### RESUMEN

Un biodigestor, es una fuente de mejora de la calidad de vida de las personas en el área rural, puesto que el mismo genera biogás, e implica la no utilización de bosta en las cocinas del área rural. El objetivo del presente trabajo fue realizar un análisis de la eficiencia de la combustión de biogás en un quemador boliviano. Se determinó la eficiencia de combustión comparando la cantidad de aire que ingresa a la combustión, mientras que la eficiencia energética del biogás fue determinada a través de la combustión del mismo. Las pruebas de hervido fueron realizadas según la norma boliviana NB83001 (IBNORCA, 2012). Los resultados muestran que el biogás presenta una combustión más eficiente que el GLP bajo las condiciones de las pruebas realizadas en el quemador artesanal utilizado. Asimismo, la llave de regulación de aire del quemador, que viene incluida en la cocina, es insuficiente para regular la combustión óptima del biogás. El valor de la eficiencia energética del quemador de biogás hallado es de sesenta y nueve por ciento.

**Palabras clave:** biogás, biodigestores, combustión de biogás, quemadores, altiplano.

#### ABSTRACT

A bio-digester is a source of improvement of the life quality of people in rural areas, since it generates biogas, avoiding the use of dung for cooking. The present research was postulated with the objective of evaluating the combustion efficiency of biogas in a Bolivian burner. The burning efficiency was determined by the comparison of the air passing to combustion, while the energetic efficiency was determined through the burning of it. The boiling test was realized according to the Bolivian Standards NB83001 (IBNORCA, 2012). Results suggest that the biogas is more combustion efficient than PLG under the conditions of the traditional burner used. Additionally, the regulation of air in the burner, which is included in the stove, is insufficient to completely regulate the optimal combustion of the biogas. The energetic efficiency of the biogas burner is of 79 %.

**Keywords:** biogas, biogas combustion, burners, Altiplano

---

<sup>1</sup> Fundación HIVOS. [gjimenezlira@gmail.com](mailto:gjimenezlira@gmail.com)

## INTRODUCCIÓN

Anivel mundial, existen diferentes referencias sobre el análisis de quema de biogás; se hallan datos específicos de combustión, obtenidos a base de experimentos realizados en condiciones normales de temperatura y presión principalmente. En el caso de los biodigestores en el altiplano, se presentan condiciones diferentes, entre las principales, además de las mencionadas anteriormente se enfrenta de la humedad, vientos, y radiación solar (Herrero, 2008). Uno de los principales motivos del estudio, es justamente obtener datos reales de la combustión del biogás en zonas de condiciones climáticas similares a las del altiplano y sentar dichos datos, como precedente para otros análisis que fueran a realizarse en condiciones similares, puesto que no existen muchas investigaciones realizadas en condiciones climáticas similares y ninguna investigación realizada en el altiplano sobre la quema de biogás.

A nivel internacional se pueden encontrar diferentes modelos de quemadores, existen algunos específicos de biogás, que permiten una obtención de mayor rendimiento energético debido a su mismo diseño. Sin embargo, en el mercado local no existe una oferta de los quemadores, mucho menos empresas que se dediquen a la producción de los mismos. La investigación sobre la eficiencia respecto a la quema de biogás, es de mucho interés en países como México, India y Angola, los estudios desarrollados allí, les permitieron encontrar una manera de diseñar quemadores, con el fin de obtener mayor beneficio y por ende mayor eficiencia en la combustión del biogás.

Existen modelos de quemadores patentados por diferentes países que son actualmente utilizados en los mercados locales. Es importante resaltar que en dichos países las investigaciones realizadas, colaboraron al creciente mercado de los biodigestores, pudiendo aportar de manera tangible al uso del biogás en el lugar.

Parte del Proyecto de Biodigestores “Bio Nati”, es empoderar a clientes sobre el uso del biogás emergente de la instalación de los mismos. Para el empoderamiento y buen uso del biogás por parte de los clientes, es que se requieren datos

verídicos y locales sobre la eficiencia de uso en las condiciones locales y bajo los mecanismos establecidos, puesto que a través de esos datos, es que se pueden realizar mejoras de diseño, implementación de nuevas ideas, mejorar formas de uso y a través de ello, mejorar la calidad de vida de las personas que utilizan el biogás en sus hogares.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Las pruebas de Hervido de Agua, en condiciones controladas, y pruebas de eficiencia de la combustión, se realizaron en el Instituto de Investigación de Procesos Químicos – IIDEPROQ ubicado en la ciudad de La Paz en la zona de Cota Cota a una altitud de 3.480 msnm una temperatura promedio de 10°C. La importancia de la ubicación en cuanto a las condiciones climáticas del lugar en donde se quema el biogás es grande, puesto que la cantidad de oxígeno en el aire, así como las temperaturas promedio y la altitud influyen en cuanto a la combustión del biogás.

Una de las principales variables influyentes en el proceso de combustión del biogás es la mezcla de oxígeno y biogás. Se toma muy en cuenta la cantidad de oxígeno disponible en el aire, la misma puede ser expresada como:  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ .

El requerimiento de aire mínimo para una combustión completa ideal es del 21% pero esta cifra debe ser aumentada para lograr una óptima combustión. La relación aire-gas puede ser optimizada aumentando la presión del aire, incrementando la apertura de la válvula dosificadora de gas. El biogás requiere de una apertura 2 a 3 veces mayor a la utilizada por el gas licuado del petróleo (GLP) en el sistema que se utiliza comúnmente. Por ello es recomendable modificar la geometría del paso de aire desde el exterior, en los sistemas utilizados comúnmente. La presión utilizada en el modelo de la cocina fue de 0,75 cm de columna de agua con una duración del consumo del gas en el reservorio, de 1 hora. Las horas de sol empleadas en el biodigestor, aseguran mayor producción de biogás, la temperatura óptima de la mezcla estiércol con agua debe mantenerse entre 25 y 35°C.

**Testeos en laboratorio**

Con el fin de determinar la eficiencia de la combustión en el quemador boliviano, se compararon las cantidades de aire que ingresa a la combustión, y se obtuvo la eficiencia energética

del biogás a través de la combustión del mismo y con la cantidad de aire óptima. Para un proceso de combustión estándar, existen parámetros que permiten determinar su eficiencia, es decir, la zona óptima del proceso donde la combustión se produce de la mejor manera posible (Figura 1).

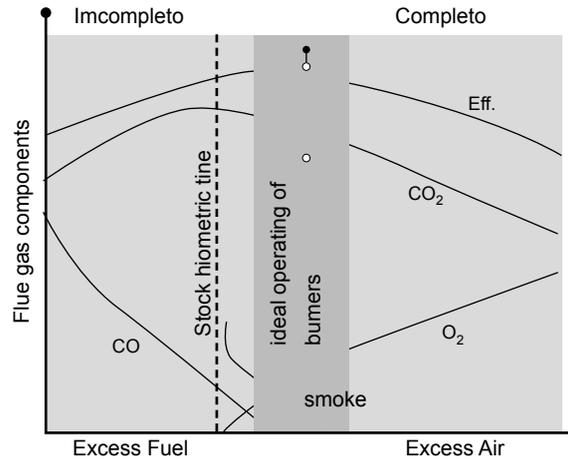


Figura 1. Zona óptima de combustión.

El uso más eficiente y de costo efectivo se produce cuando la concentración de CO<sub>2</sub> en los gases de salida se maximiza. Teóricamente, esto ocurre, cuando existe la cantidad justa de oxígeno a través de la alimentación de aire, para reaccionar con todo el carbono suministrado en el combustible. Esta cantidad de aire, se conoce comúnmente como **aire teórico**. El aire teórico requerido para la reacción de combustión depende

de la composición del combustible y de la tasa de alimentación del mismo. Adicionalmente, factores como el diseño del quemador y la operación del mismo influyen en la cantidad de aire necesario. La relación general entre el oxígeno suministrado durante la combustión de biogás y la concentración de CO<sub>2</sub> y CO en las emisiones post combustión, se ilustran a continuación (Figura 2a).

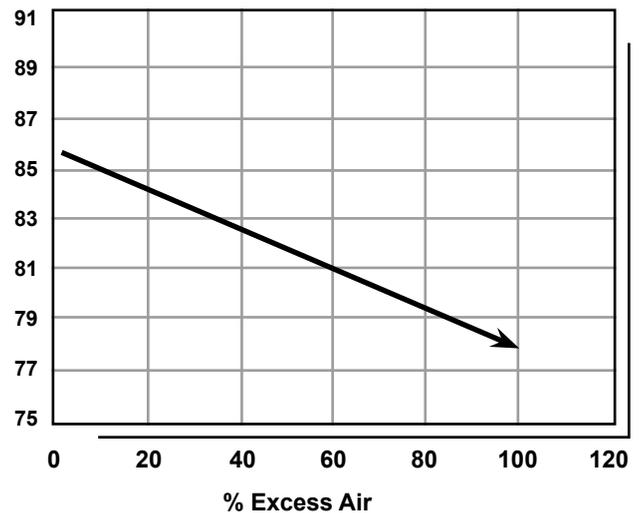
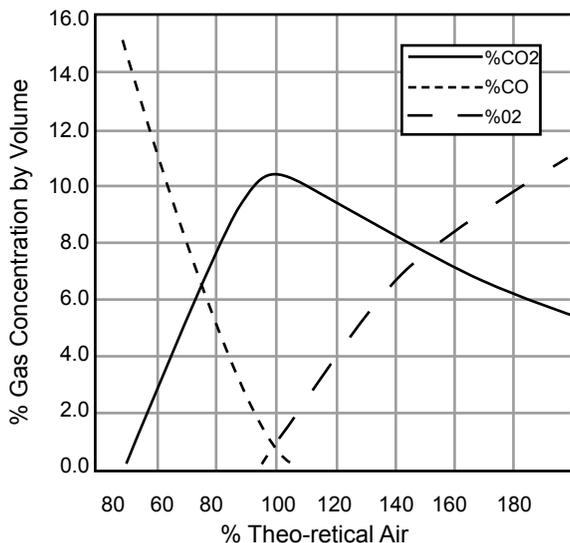


Figura 2. a) Relación O<sub>2</sub> y concentraciones de CO<sub>2</sub> y CO; b) Relación exceso de aire y eficiencia de la combustión.

A medida que el nivel de aire se aproxima a un 100% del aire teórico, la concentración de CO emitido disminuye rápidamente dado que se va formando CO<sub>2</sub> adicional. El incremento adicional de aire consigue un máximo nivel de CO<sub>2</sub> en los gases emitidos; un valor mayor aún de aire empieza a diluir los gases de combustión generando una disminución en el CO<sub>2</sub>. Con la finalidad de asegurar que la cantidad de aire necesario sea alimentado para la combustión, se induce una cantidad adicional del mismo en el sistema. Esta cantidad adicional de aire se conoce como aire **en exceso** y se expresa como el porcentaje de aire por encima de la cantidad de aire teórico. En sistemas de combustión reales, el aire en exceso para combustibles gaseosos está alrededor del 15%.

$$\% \text{ Eficiencia Combustión} = 100\% - \frac{\text{perdidas por chimenea}}{\text{poder calorífico del combustible}} \times 100$$

De acuerdo a los fundamentos anteriores, los gases provenientes de la combustión en el quemador a biogás deben ser capturados en un sistema "cerrado" de modo que no exista dilución de los mismos en contacto con la atmósfera libre. En este sentido se construye un sistema de campana para

La Figura 2b muestra la reducción de la eficiencia de la combustión a medida que se incrementa el aire en exceso.

Finalmente, la eficiencia de combustión es la medida de cuanta energía liberada por la combustión, puede ser efectivamente aprovechada. La eficiencia de combustión es obtenida sustrayendo el calor contenido en los gases de combustión (expresado como un porcentaje del contenido calorífico del combustible) del potencial total de calentamiento del combustible. Para llevar a cabo este ensayo, se requirió de una campana de captura (sistema cerrado), KIGAZ, reservorio de biogás y cocina (quemador boliviano).

la captura y conducción de los gases a través de una chimenea dónde se realiza el análisis de los mismos provenientes de la combustión. El sistema de quemador del biogás y el esquema mostrando las partes importantes del mismo se presentan en la Figura 3a y 3b respectivamente.

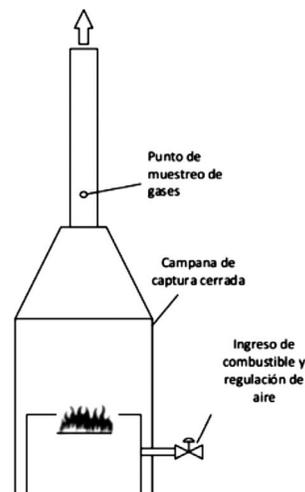


Figura 3a. Armado del sistema en laboratorio b) Diseño del sistema cerrado..

### Pruebas de hervido de agua (WBT)

El principal parámetro de medición es la eficiencia energética que se obtiene, tomando en cuenta que la misma es la eficiencia de la cocina que puede ser interpretada como la eficiencia del quemador, bajo los principios de la prueba del hervido de agua. El procedimiento realizado en las pruebas de hervido de agua para el análisis la eficiencia del quemador, está registrado en la norma

boliviana NB83001 (IBNORCA, 2012). La prueba de hervido de agua es una prueba de laboratorio estandarizada, reproducible, cuyo principal fin es el de evaluar capacidad de hervir agua y continuar el funcionamiento de una cocina a fuego lento. (Figura 4), determinando la eficiencia energética de una cocina. Para lograr dicho objetivo, se requiere realizar la medición del tiempo de ebullición, uso de combustible, evaporación de agua y temperaturas alcanzadas durante todo el proceso.

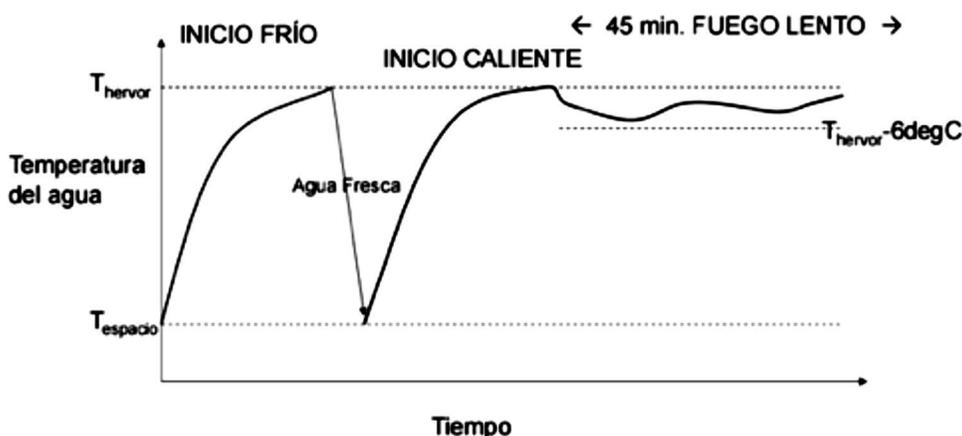


Figura 4. Relación entre la temperatura y el tiempo en una prueba de hervido de agua WBT.

Para la obtención de los resultados deseados se continuó con los siguientes cálculos:

- Consumo de biogás, dividiendo el peso total de biogás utilizado (kg), entre el tiempo empleado (horas) en llevar el agua hasta 89.7°C, que es la temperatura de hervido del agua en la ciudad de La Paz, Bolivia, para obtener el resultado en las unidades de X (kg h<sup>-1</sup>).
- Poder Calorífico del biogás, es decir X (MJ) en el biogás.

$$\text{Cantidad biogas} = \frac{\text{Peso biogás}}{\text{Peso Agua Calentada}}$$

El empleo específico del biogás, dividiendo el empleo de biogás entre la cantidad de 0°C de calentamiento del agua hasta llegar a 100°C y

$$\text{Empleo específico del biogás} = \frac{\text{Empleo de Biogás}}{89.7 - T_{\text{inicial del agua}}}$$

Eficiencia térmica, multiplicando el peso de agua (kg) calentada por el calor específico del agua (kJ kgK<sup>-1</sup>) y por el factor 1000 y dividiendo el producto

$$\text{Eficiencia Termica} = \frac{\text{Peso}_{\text{agua}} * \text{CP}_{\text{agua}} * (89.7 - T_{\text{inicial agua}})}{\text{Calor de cocción biogás}}$$

Una excelente estufa tendrá buenas medidas de eficiencia, emisiones y otros desempeños, tales como el tiempo del punto de ebullición. Las estufas intermedias no pueden funcionar tan bien en una de estas categorías. Los resultados pueden variar con la experiencia del evaluador, y las pruebas deben ser realizadas por técnicos capacitados. Los materiales fueron olla con capacidad de 3 litros, balanza de precisión 5 kg, cronómetro, probeta y sistema de conducción de biogás.

La prueba de hervido de agua consiste en tres pasos importantes: Para la fase de alta potencia de inicio frío, la cocina debe estar a temperatura ambiente al igual que el agua que contiene la olla en la cocina. El sistema debe estar correctamente armado y el tiempo inicia una vez que se enciende la cocina.

- Potencia Térmica Equivalente, dividiendo el calor de cocción disponible (MJ) entre el tiempo total de calentamiento (en horas) y entre el factor 1000, es decir X (KW).
- Factores de rendimiento, es la cantidad de biogás, dividiendo el peso total (kg) de biogás utilizado entre el peso total (kg) de agua calentada, es decir X kg leña kg<sup>-1</sup> agua.

multiplicar por el factor 1000, es decir X (gr biogás °Clitro<sup>-1</sup>) de agua.

*Empleo de Biogás*

89.7 - T<sub>inicial del agua</sub>

resultante por el Calor de cocción disponible (MJ) y multiplicar el cociente que resulte por 100, es decir X %.

Una vez que hierve el agua de la olla durante la primera fase, la misma es reemplazada por agua a temperatura ambiente para dar inicio a la segunda etapa de la prueba. La fase de alta potencia de inicio caliente, se llevó a cabo después de la primera fase. Se utiliza como combustible (biogás), desde un reservorio de 1m<sup>3</sup> para hervir una cantidad medida de agua en una olla normal. La misma cantidad se utilizó en la etapa anterior. Se establece que, al repetir la prueba con una cocina caliente, ayuda a identificar las diferencias en el rendimiento entre una cocina cuando esta fría y cuando está caliente. Esto es particularmente importante para las cocinas con elevada masa térmica, las mismas pueden mantenerse calientes durante la práctica. Sin embargo, para el caso de la cocina que se utiliza en el área rural y que es sujeto de estudio en esta oportunidad, no se realiza la fase de alta potencia.

La tercera y última fase, consiste en hervir agua a fuego lento. La cantidad de agua son los mismos cinco litros de las anteriores pruebas y el tiempo debe ser de 45 minutos. La temperatura del agua debe estar por debajo del punto de ebullición. Este paso simula el tiempo de cocción de las legumbres

o leguminosas que pueden ser cocinadas en un día ordinario por la gente del área rural. Durante todo el testeo, la presión tuvo que mantenerse constante, manteniendo siempre un estricto control de la presión en el manómetro de agua (Figura 5).



Figura 5. Nivel del manómetro (Izq.) y presión sobre el reservorio (Der.)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos, de las tres diferentes pruebas realizadas, es decir, muestra en su primera columna los parámetros

que fueron analizados durante la prueba, y en las columnas posteriores se puede observar los resultados para diferentes aperturas de la llave de ingreso de aire en el modelo de cocina provisto para el testeo.

Tabla 1. Gases de combustión.

Parámetro	Posición		
	I	II	III
O <sub>2</sub> (%)	9.4	8.7	9.6
Co (ppm)	64	225	187
T amb (°C)	28.5	28.3	28.8
T hum (°C)	361.3	360.5	412.6
NO (ppm)	6	5	8
SO <sub>2</sub> (ppm)	7	8	18
CO/CO <sub>2</sub> (%)	0.1	0.32	0.29
CO <sub>2</sub> (%)	6.6	6.9	6.4
Exc. Aire	1.81	1.71	1.84
Ren. Inf.	76.4	77.7	72.2
Ren. Sup.	76.4	77.7	72.2
CO cor	115.7	384.7	344.3

A través del análisis de la cantidad de aire ingresado para la combustión del biogás, se obtiene que cambiando tres posiciones del alimentador de aire, no existe gran variación en los niveles de exceso del aire. Entre las posiciones mínima y máxima de apertura de la llave de ingreso de aire se verifica el incremento en el exceso de aire de 1.81 a 1.84 aunque no es un valor significativo (3%). Por otro lado, el biogás presenta más emisiones de  $\text{SO}_2$ . No se observa una variación importante y clara entre los valores de eficiencia de combustión respecto a la modificación de la entrada de aire en el quemador no tiene una influencia importante en la eficiencia de la combustión del biogás dado que es un sistema semi-artesanal y no cuenta con validación experimental de fábrica.

Las condiciones de construcción de la cocina y la apertura del ingreso de aire, están basadas en el material que se encuentra en el mercado, por lo que cualquier variación en el mismo puede generar diferentes resultados, y es un campo más a analizar respecto a las condiciones estándar bajo las que se realizaron las pruebas en el laboratorio. Un análisis interesante que puede efectuarse es el de utilizar quemadores de biogás, bajo las condiciones del altiplano y comparar resultados con los obtenidos a través de las cocinas convencionales.

### **Pruebas de hervido de agua (WBT)**

Uno de los requisitos para el análisis de la combustión bajo la prueba del WBT es conocer el poder calorífico inferior (LHV). Éste fue calculado de forma teórica a partir de la medición concentración de metano del BDTA e obtuvo un valor de  $27.57 \pm 2.20 \text{ MJ kg}^{-1}$ . El flujo de biogás consumido durante la combustión fue de  $405 \text{ L d}^{-1}$  ( $P = 495 \text{ mm Hg}$  y  $T = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Uno de los factores importantes asumidos durante

el análisis es la forma de ejercer presión en el reservorio de biogás, la forma de ejercer dicha presión puede permitir la variación de los resultados obtenidos. En este sentido, la implementación de nuevas formas de ejercer presión sobre el reservorio, será una idea abierta a quienes deseen continuar con este tipo de investigación.

### **CONCLUSIONES**

El biogás resulta en una combustión más eficiente que el GLP bajo las condiciones de las pruebas realizadas en el quemador artesanal utilizado.

La llave de regulación de aire del quemador, que viene incluida en la cocina, es insuficiente para regular la combustión óptima del biogás. En otras palabras, los rendimientos de combustión obtenidos no mejorarán mucho más modificando la posición del sistema de regulación de aire semi-artesanal del quemador.

El valor del aire en exceso es alto (1.7 – 1.8) respecto al recomendado (1.15) para las características del quemador. Los valores de  $\text{O}_2$  (8.7 – 9.4 %) son aceptables aunque pueden disminuirse mejorando el sistema de control de aire y el diseño del quemador.

El valor de la eficiencia energética del quemador de biogás hallado es de 69%, cabe señalar que el quemador utilizado en esta prueba se encuentra disponible en el mercado boliviano y no requiere grandes cambios para adaptarlo a una cocina a biogás, sin embargo es altamente recomendable modificarlo para obtener una mejor eficiencia de la combustión. Se identificó que al mejorar el quemador se puede incrementar la eficiencia del biogás, puesto que la llave actual de aire en la cocina, no muestra cambio alguno.

## AGRADECIMIENTOS

A la Fundación HIVOS, en particular al proyecto de Biodigestores Bio Nati, quienes confiaron en mi idoneidad profesional para llevar a cabo la investigación, permitiendo pueda aportar con ideas nuevas.

Al Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos (IIDEPROQ), a través del Centro de Prueba de Cocinas (CPC), y al Ing. Marcelo Gorriti por el apoyo constante durante la investigación, además de la predisposición de trabajo de todas las personas del instituto y la colaboración durante las pruebas realizadas.

Artículo recibido en: 10 de diciembre 2015

Manejado por: Comité Editorial

Aceptado en: 4 de marzo de 2016

## BIBLIOGRAFÍA

Herrero Martí J. 2008. Biodigestores familiares: biodigestores de polietileno tubular de bajo costo para trópico, valle y altiplano. Cooperación Técnica Alemana – GTZ. La Paz, Bolivia. 85 p.

Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA), 2012. Cocinas mejoradas - Condiciones técnicas mínimas de instalación, funcionamiento y rendimiento. Disponible en [http://www.endev-bolivia.org/images/stories/proyecto\\_endev/cocina/Descargas/norma.pdf](http://www.endev-bolivia.org/images/stories/proyecto_endev/cocina/Descargas/norma.pdf). Consultado el 13 septiembre 2015.