



*Estimación de la generación de energía calórica a partir del bagazo de caña de azúcar mediante simulación*

*Estimation of the caloric energy generation from the sugar cane bagazo by simulation*

*Estimativa da geração de energia térmica a partir do bagaço da cana-de-açúcar por simulação*

Jandry Antonio Barreiro-Cobeña <sup>I</sup>  
[jbarreiro4399@gmail.com](mailto:jbarreiro4399@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-2694-2632>

Heidy Lissette Murillo-Zambrano <sup>II</sup>  
[hmurillo6652@utm.edu.ec](mailto:hmurillo6652@utm.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0001-6484-7794>

**Correspondencia:** [jbarreiro4399@gmail.com](mailto:jbarreiro4399@gmail.com)

Ciencias naturales  
Artículo de revisión

\***Recibido:** 15 de diciembre de 2020 \***Aceptado:** 30 de diciembre de 2020 \* **Publicado:** 09 de enero de 2021

- I. Egresado de la Carrera de Ingeniería Química, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Manabí, Ecuador.
- II. Egresado de la Carrera de Ingeniería Química, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Manabí, Ecuador.



## Resumen

Se estimó la cantidad de energía y vapor producidos a partir del bagazo de caña de azúcar, mediante un proceso de simulación, para lo cual se empleó el programa SuperPro Designer en 2 diferentes casos, uno en el cual se hizo uso de un bagazo seco y uno con un bagazo húmedo, en el cual se observó claramente que el bagazo seco tiende a producir un mayor flujo de vapor de agua en la caldera a condiciones específicas de aire en exceso y humedad en el aire, obteniendo como mayor valor el de 34,47196 kg/h de vapor.

**Palabras claves:** Bagazo; simulación; vapor.

## Abstract

The amount of energy and steam produced from the sugarcane bagasse was estimated, through a simulation process, for which the SuperPro Designer program was used in 2 different cases, one in which a dry bagasse was used and one with a wet bagasse, in which it was clearly observed that dried bagasse tends to produce a greater flow of water vapor in the boiler at specific conditions of excess air and humidity in the air, obtaining the highest value of 34,47196 kg / h of steam.

**Keywords:** Bagasse; simulation; steam.

## Resumo

A quantidade de energia e vapor produzidos a partir do bagaço da cana foi estimada por meio de um processo de simulação, para o qual o programa SuperPro Designer foi utilizado em 2 casos distintos, um em que um bagaço seco e outro com um bagaço úmido, nos quais foi claramente observado esse bagaço seco tende a produzir um maior fluxo de vapor d'água na caldeira em condições específicas de excesso de ar e umidade no ar, obtendo o maior valor de 34.47.196 kg / h de vapor.

**Palavras-chave:** Bagasse; simulação; vapor.

## Introducción

La industria del azúcar produce una cantidad alarmante de residuos, de los cuales se puede encontrar como principal, el bagazo de la caña (Nguyen, Hermansen, & Sagisaka, 2009). La producción de caña de azúcar en el Ecuador es realizada por 6 ingenios azucareros: EQ2 (conocido como la Troncal), San Carlos, Valdez, Isabel María, IANCEM y Monterrey, siendo los tres primeros quienes representan el 90 % de la producción nacional, cuya zafra se inicia en el mes de julio y termina en diciembre.

Hay 78.000 hectáreas sembradas de caña de azúcar y la provincia del Guayas posee el 72% de la producción (Morales & Ramires, 2003). Para el 2016 se produjeron más de 8 millones de toneladas métricas de caña de azúcar (CFN - Subgerencia de Análisis e Información, 2017); de cada tonelada de caña de azúcar se producen 250 kg de bagazo (Campos, 2011). El bagazo es un material que puede ser aprovechado tanto para la producción de energía (calórica) como para la producción de combustibles líquidos y sólidos (Manyuchi, Mbohwa, & Muzenda, 2019). Una alternativa para reducir los residuos de la caña de azúcar es aprovechar el bagazo como fuente renovable de energía limpia, debido a que, las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por éste no se consideran como un incremento en la concentración de gases efecto invernadero en la atmósfera, esto se lo puede apreciar en el Programa de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) del estado de Morelos (México) (Flores, Muñoz-Ledo, Flores, & Cano, 2008) el cual estimó la cantidad de energía aprovechada del bagazo, que puede ser utilizada para otras etapas del proceso.

Una solución viable para el manejo del bagazo como residuo es el uso del mismo en la generación de energía, por lo cual, es factible estudiar cómo se comportaría en la producción de calor para un sistema de calderas, calor que se emplearía en otras etapas del proceso de obtención del azúcar. Es por este motivo que se realizara una estimación de la generación de energía a partir del bagazo de caña de azúcar mediante una modelación y simulación.

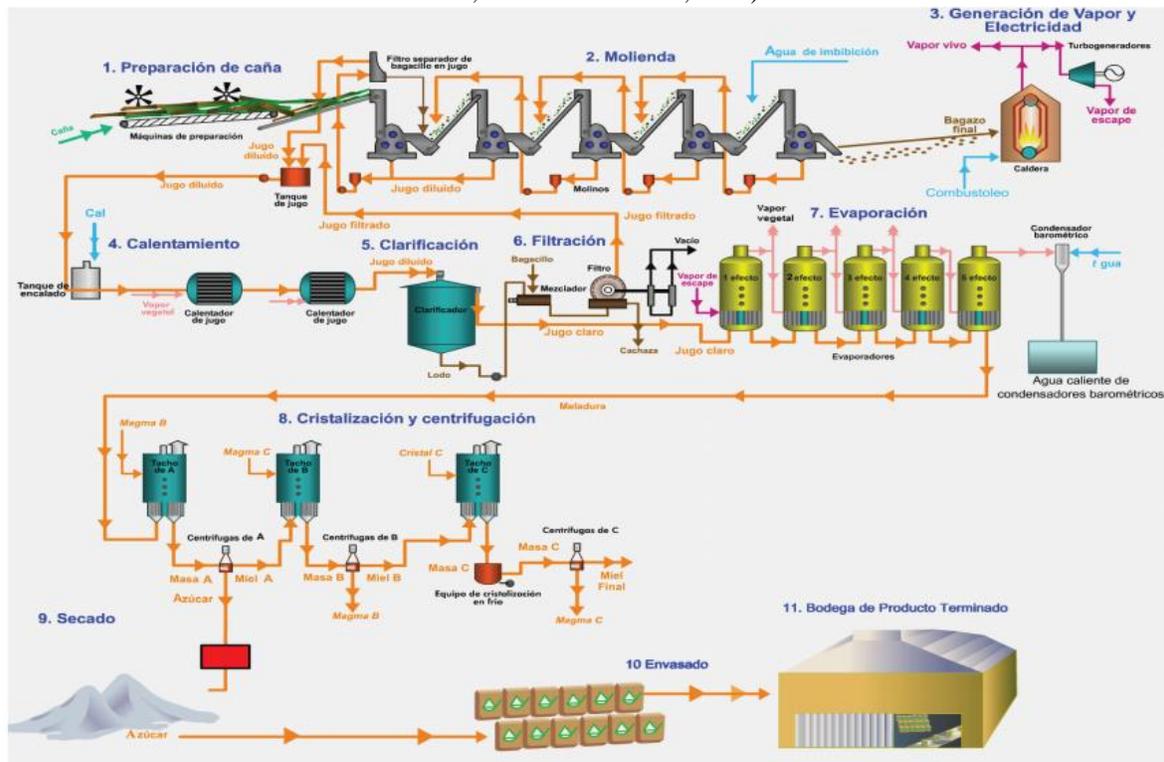
## Materiales y métodos

### Descripción del procesamiento de la caña de azúcar

Una vez cosechada la caña de azúcar, esta se descarga en las mesas alimentadoras y se conduce hacia cuchillas rotatorias que se encargan de cortar los tallos para disminuir su tamaño y desfibradoras que desmenuzan la caña. En la etapa de molienda se extrae el jugo de la caña a través de un tándem de molinos de 4 mazas, en el cuarto molino se añade agua a alta temperatura (70°C) y en los molidos tres y dos agua más jugo para obtener la máxima cantidad de sacarosa en un proceso llamado maceración (Dominguez Manjarrez , Bravo Álvarez, & Sosa Echeverría, 2014)

La caña se somete a compresión en los rodillos o mazas del molino, lo cual propicia la salida del contenido del líquido de los tallos. Se consideran satisfactorias aquellas extracciones, entre 58 a 63%; es decir, cuando se obtienen de 580 a 630 kilogramos de jugo por tonelada de caña. (Osorio Cadavid, 2007)

**Figura 1:** Diagrama de flujo del proceso de producción de azúcar estándar (Dominguez Manjarrez, Bravo Álvarez, & Sosa Echeverría, 2014)



Los productos finales de esta fase son el “jugo crudo” y el “bagazo”; el primero, es la materia prima que se destina a la producción de panela, mientras el segundo se emplea como material combustible para la hornilla después de secado. (Osorio Cadavid, 2007)

### **Bagazo**

El bagazo de caña se produce como consecuencia de la fabricación de azúcar y constituye un subproducto de esta producción. Es un combustible natural para producir vapor en las fábricas azucareras. El bagazo constituye el 40-50% de la caña de azúcar. (Espinoza Aguilar, 2015). Es un material fibroso, heterogéneo en cuanto a su composición granulométrica y estructural, que presenta relativamente baja densidad y un alto contenido de humedad, en las condiciones en que se obtiene del proceso de molienda de la caña. (Espinoza Aguilar, 2015)

Cuando el bagazo sale del molino posee aproximadamente la siguiente composición:

- Humedad (50%)
- Sólidos solubles (5%)
- Sólidos insolubles o fibra cruda (45%)

Además de su composición química es la siguiente:

- Carbono: 47-49%
- Hidrógeno: 5.5-6.5 %
- Oxígeno: 38-44%
- Cenizas: 2.5-3.5%

### **Secadores y Calderas de bagazo**

Los secadores de bagazo aún conservan un gran espacio en la industria azucarera y sus derivados, no solo como medio tradicional de recuperar la energía de los gases de escape de las calderas, sino como paso necesario para un procesamiento ulterior del bagazo, por ejemplo: para fabricar briquetas y pellets, para las fábricas de tableros de partículas, para evitar el deterioro microbiológico, para su gasificación. (Olmo, Casanova Cabeza, Galvez Taupier, Lodos Fernandez, Fernandez Rodriguez, & Abril Gonzalez, 2015)

Las calderas de quemar bagazo sufren de problemas de estabilidad debido a su alto contenido de humedad (50 % o más al quemarse). Bajo una gama amplia de condiciones del horno existe el mismo ciclo (acumulación material, secado y combustión). Algunas condiciones del horno pueden presentar grandes fluctuaciones en la presión del generador, reducción en la producción de vapor y generalmente un comportamiento inestable. La estabilidad es importante debido a que de tales generadores de vapor depende a menudo el suministro de toda la energía del ingenio. (Olmo, Casanova Cabeza, Galvez Taupier, Lodos Fernandez, Fernandez Rodriguez, & Abril Gonzalez, 2015)

### **Beneficios y dificultades del secado del bagazo**

El secador como superficie recuperativa en la generación de vapor. Es conocido que las calderas de vapor de la producción azucarera en la actualidad muestran en los gases de escape temperaturas superiores que el mínimo posible, lo que provoca grandes pérdidas de energía o bagazo que es su combustible natural. (Olmo, Casanova Cabeza, Galvez Taupier, Lodos Fernandez, Fernandez Rodriguez, & Abril Gonzalez, 2015)

Al utilizar los gases de escape de las calderas para secar el bagazo, el secador actúa como una superficie recuperativa adicional de la caldera, que si en la actualidad expulsan sus gases a temperaturas muy por encima de lo teóricamente posible ( $\approx 150$  a  $220^\circ$  C), perdiendo esa energía, los puede expulsar a la salida del Secador entre los  $80$  y  $100^\circ$  C. Se puede notar la gran diferencia. (Olmo, Casanova Cabeza, Galvez Taupier, Lodos Fernandez, Fernandez Rodriguez, & Abril Gonzalez, 2015)

Mediante la utilización solo de los llamados economizadores (calentadores de agua de alimentar las calderas) y los calentadores del aire para la combustión como superficies recuperativas, resulta económicamente imposible lograr valores tan altos de agotamiento de la energía de los gases de escape. Esto se debe que los mismos requieren una pared entre los dos fluidos que participa en el intercambio de calor, cuyo tamaño se incrementa en una relación exponencial en dependencia de una cada vez menor temperatura final requerida. (Olmo, Casanova Cabeza, Galvez Taupier, Lodos Fernandez, Fernandez Rodriguez, & Abril Gonzalez, 2015)

### Estimación de la energía potencial calórica

Para las estimaciones de la energía potencial calórica que se puede obtener a partir del bagazo de la caña de azúcar, se partió de los datos de la composición química reportada por Manals Cutiño la cual se describe en la tabla N°1 a continuación:

**Tabla 1:** Propiedades químicas del bagazo de caña (Manals-Cutiño, Penedo-Medina, & Salas-Tort, 2015)

Elemento	Composición (%)
C	48.58
H	5.97
O	38.94
N	0.20

Así como también con el software SuperPro Designer. A partir de estos datos y el empleo del software es posible estimar la cantidad de energía calórica que se puede obtener del residuo en cuestión.

### Datos para casos de simulación.

Para proceder con las simulaciones se tomó en cuenta 3 factores y 3 niveles, que se estiman puedan variar estocásticamente, estaremos

- Humedad del aire
- Relación agua en el último molino /caña de azúcar en la entrada
- Aire en exceso

**Tabla 2:** Factores y niveles empleados en la simulación

Aire en exceso %	Relación agua en el último molino /caña de azúcar en la entrada	Humedad del aire gH <sub>2</sub> O/kg de aire seco
15	0,1Tm/1 Tm	15.0
15	0,1Tm/1 Tm	15.5
15	0,1Tm/1 Tm	16
15	0,2Tm/1 Tm	15.0
15	0,2Tm/1 Tm	15.5

15	0,2Tm/1 Tm	16
15	0,3Tm/1 Tm	15.0
15	0,3Tm/1 Tm	15.5
15	0,3Tm/1 Tm	16
20	0,1Tm/1 Tm	15.0
20	0,1Tm/1 Tm	15.5
20	0,1Tm/1 Tm	16
20	0,2Tm/1 Tm	15.0
20	0,2Tm/1 Tm	15.5
20	0,2Tm/1 Tm	16
20	0,3Tm/1 Tm	15.0
20	0,3Tm/1 Tm	15.5
20	0,3Tm/1 Tm	16
25	0,1Tm/1 Tm	15.0
25	0,1Tm/1 Tm	15.5
25	0,1Tm/1 Tm	16
25	0,2Tm/1 Tm	15.0
25	0,2Tm/1 Tm	15.5
25	0,2Tm/1 Tm	16
25	0,3Tm/1 Tm	15.0
25	0,3Tm/1 Tm	15.5
25	0,3Tm/1 Tm	16

Los datos de humedad del aire se obtuvieron mediante el uso de una tabla psicométrica junto con los datos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2017). Se hizo uso de los mismos datos tanto para el proceso de simulación con secado y sin secado.

### Resultados y análisis

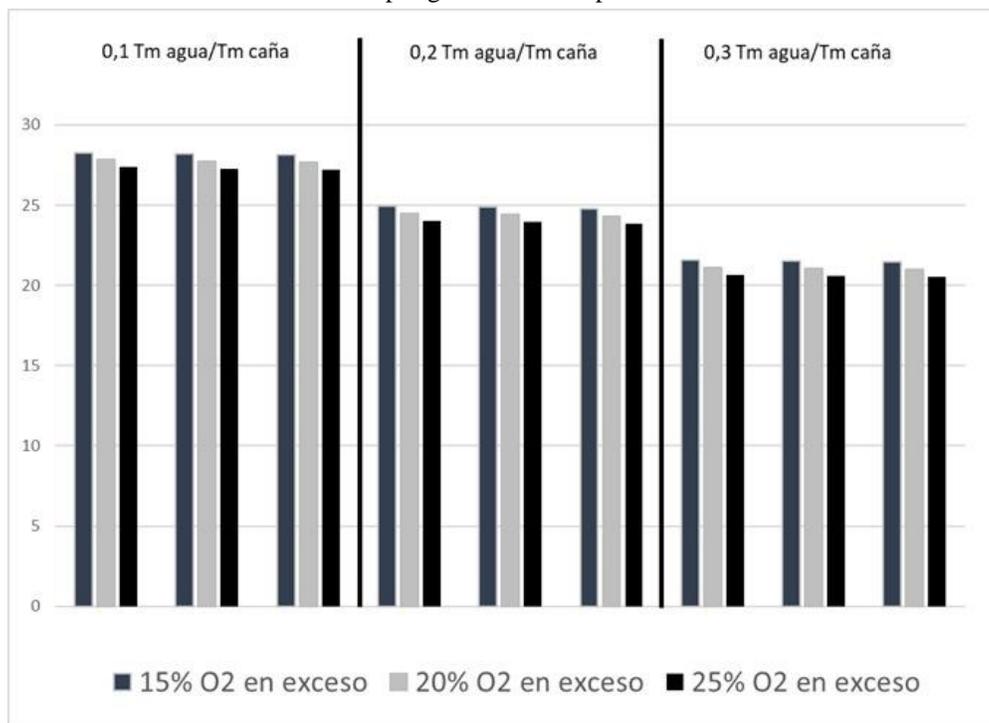
A continuación, se detallan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas para el proceso de estimación de energía sin secado y con de bagazo. Para la ejecución de las

simulaciones fueron empleados datos relativamente aproximados a las condiciones de humedad del aire, mismos que fueron obtenidos del INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología).

- **Caso 1: Proceso de quema de bagazo húmedo**

Con base a los datos obtenidos en este proceso se dio a conocer que la cantidad de flujo de vapor disminuirá con respecto a la cantidad de agua que ingrese en el último molino, el mayor flujo que se obtuvo fue de 28,27569 kg/h de vapor a 15% de aire en exceso, 0.1Tm de agua/Tm de caña de azúcar y 15g de agua/kg de aire y el menor fue de 20,52602 kg/h de vapor a 25% de aire en exceso, 0.3Tm de agua/Tm de caña y 16g de agua/kg de aire, es decir que cuando se tiene una menor humedad en el aire como en el bagazo, la caldera funciona a un mayor rendimiento.

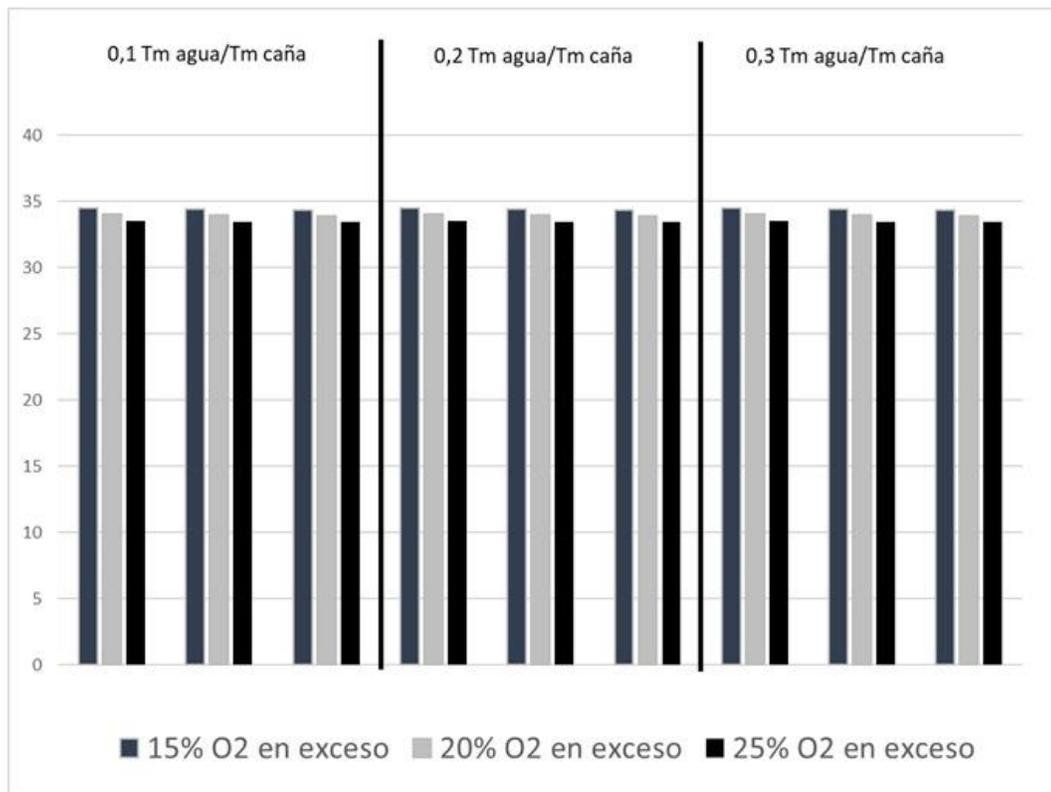
**Grafica 2:** Vapor generado en un proceso sin secado



- **Caso 2: Quema de bagazo seco**

En este proceso, en donde se incluye el secado, se obtuvo un mayor rendimiento de generación de vapor en la caldera, puesto que se registró, para las condiciones de 15% de aire en exceso, 0,1 Tm de agua/Tm de caña y 15 g de agua/kg de aire seco, un valor máximo de 34,47196 kg/h y un valor mínimo de 33,42414 kg/h para las condiciones de 25% de aire en exceso, 0,3 Tm de agua/Tm de caña y 16 g de agua/kg de aire seco. Cuando existe el secado dentro del proceso, el rendimiento de la caldera aumenta en 1.23 veces, lo que da a conocer que el secado es una parte esencial para poder trabajar en las mejores condiciones posibles. Olmo y otros en su artículo titulado “El bagazo de la caña de azúcar. Propiedades, constitución y potencial” exponen que la cantidad de energía producida en un bagazo con menor humedad es mayor que uno que la contenga, de hecho mencionan que el valor calorico es 1,4 veces mejor en un bagazo seco. (Olmo, y otros, 2015).

**Grafica 3:** Vapor generado en un proceso con secado



Las barras de los gráficos corresponden a los valores obtenidos para 15, 15,5 y 16 g de agua por kg de aire seco. Según los resultados presentados para el caso 1 se obtuvo una desviación del 2,80988787798715 kg/h de flujo de vapor y para el caso 2 se obtuvo una variación de 0,383009780316311 kg/h de flujo de vapor, es decir, que la propuesta en el caso 2, donde el secado está presente en el proceso, disminuye la variabilidad del resultado debido a la variación estocástica de los factores en estudio. Por lo cual el flujo de vapor de agua será más homogéneo.

## **Conclusiones**

Al final de las simulaciones se comprobó que tanto la energía calórica como el flujo de vapor, producidos en el uso del bagazo, redujeron cuando existía mayor presencia de humedad, es decir cuando se ingresaba mayor cantidad de agua al molino. Además, se comprobó que cuando en el proceso interviene un secado, la cantidad de agua que ingresa al último molino no interfiere en la cantidad de vapor y calor que puede producir, solo se encontrará una variación en estos resultados, cuando en la humedad del aire o en cantidad aire en exceso que entre al proceso, se produzca alguna alteración. La humedad del aire puede presentar fluctuaciones respecto a la temperatura y temporada del año, esto haría que la producción de vapor y calor presenten variaciones.

Los resultados de mayor generación de vapor y energía calórica se observan en el proceso donde existe secado y la humedad del aire era menor, ya que al ingresar a la caldera en estas condiciones, el rendimiento de la misma es mucho mayor.

Se estimó con éxito la cantidad de energía y vapor que se puede producir bajo estas condiciones usando al bagazo como material de combustión en la caldera en los dos casos presentados y así se dio a conocer el potencial que este tiene como combustible sólido.

## **Agradecimiento**

A los desarrolladores del software SuperPro Designer, a los referentes bibliográficos, que gracias a estos se pudo obtener los datos necesarios para el correcto desarrollo de las simulaciones para este artículo

## Referencias

1. Campos, J. (18 de Marzo de 2011). Caña dulce, caña brava. LISTIN DIARIO.
2. CFN - Subgerencia de Análisis e Información. (2017). CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR - ELABORACIÓN Y REFINADO DE AZÚCAR DE CAÑA Y MELAZA DE CAÑA; REMOLACHA AZUCARERA, ETC. Quito: CORPORACION FINANCIERA NACIONAL.
3. Dominguez Manjarrez , C. A., Bravo Álvarez, H., & Sosa Echeverría, R. (2014). Prevención, minimización y control de la contaminación ambiental en un ingenio azucarero de México. Ingeniería Investigación y Tecnología, 549-560.
4. Espinoza Aguilar, M. S. (2015). Diseño de Plantas Agroindustriales. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo.
5. Flores, R., Muñoz-Ledo, R., Flores, B. B., & Cano, K. I. (2008). Estimación de la generación de energía a partir de biomasa para proyectos del programa de mecanismo de desarrollo limpio. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 35-39.
6. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (30 de Junio de 2017). Anuario Meteorológico. Quito, Pichincha, Ecuador: INAMHI.
7. Manals-Cutiño, E., Penedo-Medina, M., & Salas-Tort, D. (2015). Caracterización del bagazo de caña como biomasa vegetal. Tecnología Química, 244-255.
8. Manyuchi, M., Mbohwa, C., & Muzenda, E. (2019). Evaluating the Usability of Bio Coal from Sugar Cane Bagasse as a Solid Fuel. Procedia Manufacturing, 516-521.
9. Morales, J., & Ramires, J. (05 de Enero de 2003). Análisis Estadístico del cultivo y producción de Caña de Azúcar. Guayaquil, Guayas, Ecuador: Escuela Politecnica del Litoral.
10. Nguyen, T. L., Hermansen, J., & Sagisaka, M. (2009). Fossil energy savings potential of sugar cane bio-energy systems. Applied Energy, 132-139.

11. Olmo, O. A., Casanova Cabeza, E., Galvez Taupier, L., Lodos Fernandez, J., Fernandez Rodriguez, N., & Abril Gonzalez, A. (2015). El bagazo de la caña de azúcar. Propiedades, constitución y potencial. En Patrimonio Científico del nuevo ICIDCA. Habana: ICIDCA.
12. Osorio Cadavid, G. (2007). BUENAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS -BPA- Y BUENAS PRÁCTICAS DE MANUFACTURA -BPM EN LA PRODUCCIÓN DE CAÑA Y PANELA. Osorio, Colombia: CTP Print Ltda.

©2020 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).