

**AUTOMATIC CONTROL OF MICROCLIMATE IN THE GREENHOUSE FOR  
EFFICIENT DRYING OF COCOA BEANS****CONTROL AUTOMÁTICO DE MICROCLIMA EN INVERNADERO PARA  
SECADO EFICIENTE DE GRANOS DE CACAO****PhD. Carlos Lizardo Corzo Ruiz; Ph.D Daniel Alexander Velazco Capacho****Unidades Tecnológicas de Santander – UTS**Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías, Grupo de Investigación en Control Avanzado  
GICAVCalle de los Estudiantes, No. 9-82, Bucaramanga. Tel.: (+577) 6917700, Ext. 1341  
E-mail: ccorzo@correo.uts.edu.co; dvelazco@correo.uts.edu.co

**Abstract:** The purpose of the drying process of cocoa beans is to achieve acceptable moisture parameters for commercialization. To respond to this requirement, a greenhouse drying system was implemented with an environment controlled by fuzzy logic and a user interface from a cell phone. The results obtained showed the effectiveness of the implementation to achieve good quality grains with humidity of eight (8) % in six (6) days of drying.

**Keywords:** Fermentation and drying of cocoa, climatic variables, temperature, monitoring, humidity monitoring, Fuzzy logic

**Resumen:** El propósito del proceso de secado de granos de cacao es conseguir parámetros de humedad aceptables para la comercialización. Para dar respuesta a este requerimiento se implementó un sistema de secado bajo invernadero con ambiente controlado mediante lógica difusa e interfaz de usuario desde un móvil celular. Los resultados obtenidos mostraron la efectividad de la implementación al lograr granos de buena calidad con humedad del ocho (8) % en seis (6) días de secado.

**Palabras clave:** Fermentación y secado de cacao, variables climáticas, monitoreo de temperatura, monitoreo de humedad, control difuso.

**1. INTRODUCCIÓN**

El departamento de Santander es el primer productor de cacao en Colombia con una producción de 19.085 toneladas/año, en la que se han logrado obtener 450 Kg/Ha del potencial máximo establecido que es de 1.200 Kg/Ha (Fedecacao, 2016).

Uno de los aspectos que tienen impacto sobre las cifras mencionadas, es el proceso de fermentación y secado de los granos de cacao, el cual ha sido realizado desde tiempo atrás de forma artesanal y manual (Torres, Archila, Tronco, Porto y Tiberti, 2013).

El proceso de secado de cacao requiere que se realice a los granos un acondicionamiento previo distribuido en dos etapas. Una llamada anaeróbica en la que se someten los granos a una temperatura de 45 °C para impedir su germinación, y la otra llamada aeróbica en la cual se alcanzan los 60 °C la cual se aplica para disponer el grano al proceso de deshidratación o secado (González y Cely, 2013).

Luego del acondicionamiento se somete a los granos a deshidratación mediante un proceso que se inicia con humedad del grano alrededor del 55 % después de la fermentación y se pretende llevarla a valores cercanos al 7 %, que es valor aceptado para la comercialización del grano en

seco. En este punto es fundamental mantener estables las condiciones ambientales del grano ya que de ello depende el sabor y la calidad del producto final (Prado y Zambrano, 2015), (Araque, Díaz y Guerrero, 2016).

De igual manera, deben mantenerse controlados los tiempos del proceso (Bermeo, De-Souza, Fernández, Dalton, Nogueira y Barreto, 2016) ya que, si el secado es muy rápido, se alteran los procesos químicos al interior del grano y se generan en consecuencia sabores ácidos. En contraste, si el proceso de secado es muy lento el grano se fermenta y se pierde.

Con los desarrollos tecnológicos en el campo de instrumentación y control de procesos agroindustriales y de agricultura de precisión, se han planteado alternativas de solución a esta problemática en referencia al control microclimático de temperatura y humedad en ambientes cerrados (Ramírez, 2006)(Castellanos, Alvarado y Aranguren, 2015), fermentación y secado de granos de cacao (Reza y Espinoza, 2015) y algoritmos de lógica difusa para el control de variables del ambiente y del suelo ((Hernandez y Romero, 2016)(Camargo, Coronel y Calderón, 2015).

Con fundamento en lo expuesto se planteó una alternativa de solución a la problemática de conservar las condiciones necesarias para el logro de granos de cacao de excelente calidad en sabor y aroma, para lo cual se implementó un invernadero con ambiente controlado para el secado eficiente de granos de cacao (Sánchez, 2013)(Rodríguez, cortés y Peña, 2016), que ofrece al productor datos de control del proceso de secado, para su análisis y ajuste mediante una interfaz gráfica de fácil acceso en la web, a través de dispositivos de telefonía móvil celular (Gómez y Durán, 2015).

La producción de cacao en su fase definitiva tiene múltiples factores de riesgo, especialmente en el proceso de secado en referencia a la generación de un ambiente controlado en humedad y temperatura; variables de las cuales depende directamente el éxito del proceso y sobre las cuales el método tradicional de secado no realiza un control adecuado más allá de la comprobación empírica.

## 2. METODOLOGÍA Y DESARROLLO

Se realizó el diseño y construcción de un invernadero prototipo a escala en el que se ubicaron mesas o bandejas de secado sobre las cuales se extendieron los granos de cacao a secar.

Se utilizó ventilación forzada la cual se ubicó de forma paralela a las mesas de secado. Las dimensiones finales del invernadero prototipo fueron cinco metros de largo, por dos metros de ancho y una altura máxima de 2,70 m. En la Fig. 1, se presenta el prototipo a escala construido.



Fig. 1. Prototipo de invernadero automatizado a escala para el secado de granos de cacao

El modelo del prototipo construido está basado en la estructura propuesta por (Sandy et al., 2015), la cual integra una estructura metálica recubierta por lámina de policarbonato alveolar que permite el ingreso de los rayos solares y generar calor al interior.

Se equipó el prototipo con tres extractores, dispuestos para mantener la temperatura apropiada y un sistema de retroalimentación de aire (Restrepo, Becerra y Pardo, 2015), que condensa el aire húmedo y caliente proveniente del interior del invernadero para reinyectarlo a través de una plancha de acero, ubicada en la parte inferior de las mesas, que direcciona el aire caliente hacia los granos.

### 2.1 Software de control Difuso

Se implementó un control a partir de una plataforma genérica para el desarrollo y simulación de sistemas de control difuso para el control de temperatura y humedad sobre PC, en el que se definieron variables de entrada-salida, y un conjunto de reglas y opciones de inferencia para favorecer el microclima requerido para el secado de granos de cacao. La interfaz de usuario implementada fue del tipo multi documento para posibilitar el uso de varias ventanas paralelamente.

Se establecieron como variables de entrada, la temperatura ambiental (interior del invernadero), la temperatura superficial del grano y la humedad del grano.

Se utilizó el lenguaje de programación PYTHON en el que la sintaxis favorece la legibilidad del código con gestión de multiparadigma, ya que soporta varios tipos de programación como la

orientada a objetos, imperativa y programación funcional.

El diseño de la aplicación implementada se presenta en la fig. 2.

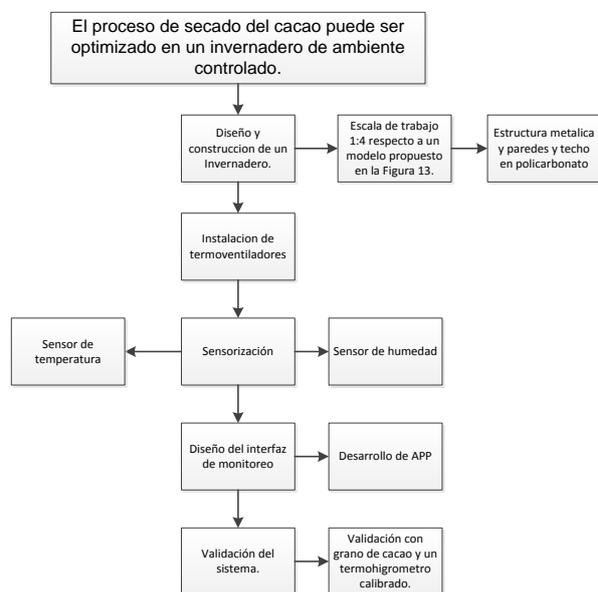


Fig. 2. Diseño en bloques del sistema de control difuso de temperatura y humedad implementado mediante PYTHON.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Muestra de Control - Secado tradicional.

Se realizó como muestra de control un secado tradicional en condiciones de humedad relativa con fluctuaciones entre 53 y 90 % y de temperatura entre 22,7 y 31,3°C sin exponer el grano a lluvia o variaciones en el clima. En la fig. 3, se muestran las mediciones obtenidas.

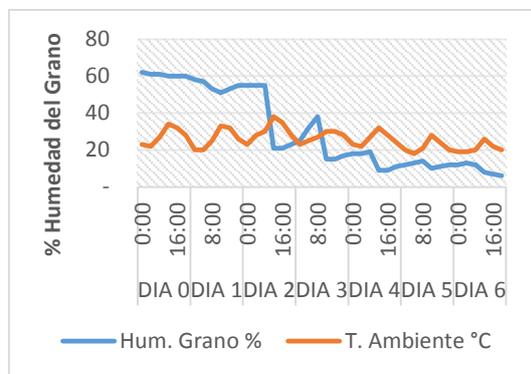


Fig. 3. Variación de temperatura y humedad relativa del ambiente, en muestra de control

#### 3.2 Muestra sin pre-secado.

Se realizó el proceso de secado en el prototipo de invernadero sin realizar el proceso de pre-secado de los granos de cacao, los cuales fueron introducidos a la estructura desde el día 0. Las mediciones se presentan en la Fig. 4.

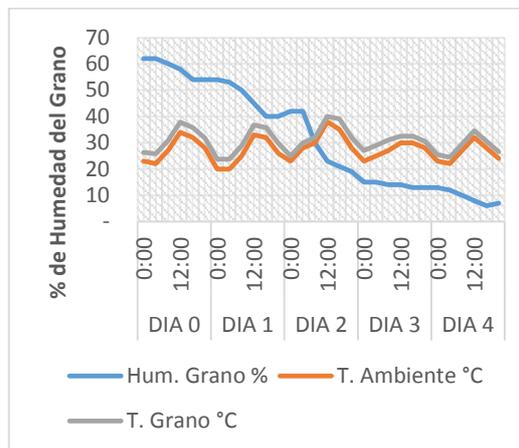


Fig. 4. Variación de temperatura y humedad relativa del ambiente, en muestra sin pre-secado

Se observa que la temperatura máxima del sistema alcanzó 38 °C, lo que evidenció incapacidad de los extractores para disminuir el exceso de calor generado por los procesos químicos existentes en los granos sin pre-secado y la humedad relativa del grano disminuyó gradualmente hasta alcanzar un 7% menos que la humedad del ambiente en el cuarto día.

#### 3.2 Muestra con pre-secado de un día.

En esta muestra se usaron granos de cacao pre-secados durante un día el cual corresponde al día cero de la prueba. Por tanto, se encontraba en condiciones de ambiente diferentes a las existentes dentro del prototipo de invernadero.

A partir del segundo día, la humedad relativa presentó variaciones entre 30,8 y 53,2% y la temperatura estuvo entre los 36,4 y 40°C. En la Fig. 5, se presentan los resultados de las mediciones realizadas.

En este tratamiento de la prueba se establecieron las condiciones del microclima favorables para el secado de granos de cacao y el ambiente del invernadero prototipo estuvo bajo control. La curva de humedad del grano muestra una característica homogénea que alcanzó un 7,5% al final del cuarto día. Los resultados de la prueba se muestran en la Fig. 5.

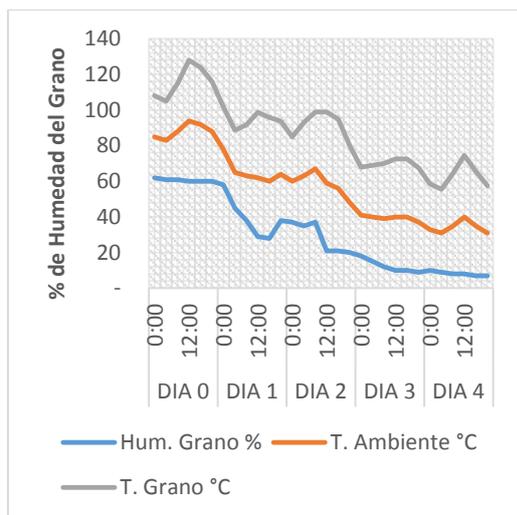


Fig. 5. Variación de temperatura y humedad relativa del ambiente, en muestra de control con pre-secado de un día.

### 3. CONCLUSIONES

A partir del análisis e inferencia de los resultados se concluye que la curva de secado no fue homogénea, el grano absorbió humedad durante la noche y el porcentaje de humedad óptima (7,5%) se alcanzó al sexto día de secado. La humedad relativa del ambiente es el factor crítico que determinará un secado homogéneo y evitará la proliferación de moho en los granos.

La temperatura del grano está condicionada por la temperatura y la humedad relativa del ambiente.

El pre-secado de dos días en condiciones de temperatura ambiental (alrededor de los 30°C) permite una pérdida homogénea de agua superficial y la volatilización de ácidos grasos y purinas, lo cual influye de manera positiva en el sabor final del grano. Sin embargo, en cuanto al proceso de secado no presenta ninguna agilización.

Una vez alcanzado el punto crítico, el secado puede ser realizado a temperaturas mayores y en menos tiempo.

El secado es un proceso discontinuo y no uniforme. Al inicio la velocidad de secado permanece constante hasta que el grano alcanza un valor crítico alrededor del 50 %. Una vez en este punto, la humedad desciende rápidamente hasta cerca del 25 %. Este periodo corresponde a la pérdida de agua superficial en el grano y a partir de este punto, la velocidad de secado disminuye y corresponde a la eliminación del agua interna del grano que alcanza humedades entre 6% y 8%.

### REFERENCIAS

- Araque, J. Díaz, J. y Guerrero, A. (2016). Optimización por recocido simulado de un convertidor multinivel monofásico con modulación PWM sinusoidal de múltiple portadora. *Revista Colombiana de Tecnologías Avanzadas (RCTA)* Vol 1. Número 27.
- Barroso García, A. (2015). Control y Monitorización de un Invernadero a través de una Aplicación Móvil. *ETSI\_Diseño*.
- Bermeo, W., De-Souza, A., Fernandes, T., Dalton, H., Nogueira, L. y Barreto, Luiz. (2016). Control modo Deslizante Aplicado en la malla de corriente para una aplicación de una base DSP para el control de posición de un motor de inducción de Jaula de Ardilla. *Revista Colombiana de Tecnologías Avanzadas (RCTA)* Vol 1. Número 27.
- Camargo, E., Coronel, C. y Calderón, M. (2015). Hogar inteligente por control de voz usando redes neuronales. *Revista Colombiana de Tecnologías Avanzadas (RCTA)* Vol 1. Número 25.
- Castellanos, J., Alvarado, R. y Aranguren S. (2015). Diseño de Estrategia de Control Avanzado para Sistema de Celdas de Flotación en el Tratamiento de aguas de Producción de Petróleo y Gas. *Revista Colombiana de Tecnologías Avanzadas (RCTA)* Vol 2. Número 26.
- Gómez, P. y Durán, C. (2015). Adquisición de Datos de una Matriz de Sensorres de Gases (E-NOSE) mediante Módulos de Comunicación XBEE. *Revista Colombiana de Tecnologías Avanzadas (RCTA)* Vol 2. Número 26.
- González, F. y Cely, M. (2013). Estudio del potencial eólico y solar de Cúcuta, Norte de Santander. *Revista Colombiana de Tecnologías Avanzadas (RCTA)* Vol 2. Número 22.
- Hernandez, I. D., & Romero Larrota, A. (2016). Simulación de una estrategia de control de temperatura y humedad relativa, basada en lógica difusa, para el control climático de galpones de exportación avícola. *Especialización en automatización industrial -Universidad Autónoma de Bucaramanga UNAB*, p. 44. Bucaramanga.
- López-Cruz, I. L., & Hernández-Larragoiti, L. (2010). Modelos neuro-difusos para temperatura y humedad del aire en invernaderos tipo cenital y capilla en el centro de México. *Agrociencia*, 44(7), 791–805.
- Restrepo, Y., Becerra, J. y Pardo, A. (2015). Metodología de Detección de Fallas de un

- Motor Asíncrono. Revista Colombiana de Tecnologías Avanzadas (RCTA) Vol 2. Número 26
- Rodríguez, E., Cortés, E. y Peña, C. (2016). Aplicación de la Metodología QFD en el Desarrollo de una impresora 3D. Revista Colombiana de Tecnologías Avanzadas (RCTA) Vol 2. Número 28.
- Sánchez, R. (2013). Estado del Arte del Desarrollo de Sistemas Embebidos desde una perspectiva integrada entre el Hardware y el software. Revista Colombiana de Tecnologías Avanzadas (RCTA) Vol 2. Número 22.
- Sandy, X., Reza, C., & Espinoza, J. C. (2015). *Control de fermentado y evaluación de un prototipo de secador con ambiente controlado para cacao nacional*. IICA Programa Alianza en Energía y Ambiente con la Región Andina Ministerio de Asuntos Exteriores de Finlandia.
- Janata, J., 2010. *Principles of chemical sensors*, Springer Science & Business Media.
- Korotcenkov, G., 2010. *Chemical Sensors: Volume 1 General Approaches*, Momentum Press.
- Monjo, T.P., 2005. La patología y el medio ambiente en las granjas de broilers. *Selecciones avícolas*, 47(11), pp.702--710.
- Torres, C. J., Archila, J. F., Tronco M. L., Becker, M., Porto, A., y Tiberti, A. (2013). Estudio cinemático de una plataforma robótica para agricultura. Revista Colombiana de Tecnologías Avanzadas (RCTA) Vol 2. Número 22