

Desarrollo e implementación de un prototipo de acero inoxidable para evaluar el proceso de fermentación de granos de cacao.

W. Ipanaqué¹, J. Castillo¹, H. Robles¹, I. Belupú¹

(1) Facultad De Ingeniería, Dpto. de Electrónica y Automática, Universidad de Piura, Piura, Perú

RESUMEN

En la post-cosecha del cacao se ha encontrado un gran potencial para implementar tecnologías que mejoren estos procesos, en particular el de fermentación de cacao, es así que se desarrolló un prototipo de acero inoxidable para llevar a cabo la fermentación de este proceso, con el propósito de generar alternativas de uso práctico para productores de este cultivo y obtener un producto con características deseables de calidad. El prototipo desarrollado se instaló en la Asociación de Productores de Banano y Cacao Orgánico (ASPROBO); consta de un sistema mecánico que realiza remociones de granos de cacao a velocidades bajas necesarias para el desarrollo del proceso fermentativo, además permite la recolección del mucílago que se segrega durante los primeros días de la fermentación, para ser utilizado en otras aplicaciones; también posee un sistema de aislamiento que evita pérdidas de calor y humedad en los granos, esto asegura la proliferación de los microorganismos responsables del proceso.

La recolección de datos de temperatura y de los sucesos que ocurren durante la fermentación, se lograron con sistemas embebidos, conectados a diversos sensores que forman parte del prototipo. El sistema adquiere los datos con un tiempo de muestreo igual a 10 segundos mostrándolos en tiempo real, mediante una interfaz con un entorno intuitivo y sencillo de utilizar. Este sistema permite tener acceso al proceso desde una página Web, para monitorear, activar y desactivar las principales funciones.

Para evaluar los resultados se fermentaron tres lotes de 100 Kg de granos de cacao en el prototipo construido y paralelamente 500 Kg de granos en cajas de madera, con la finalidad de comparar la temperatura, humedad y pH en ambos lotes. Al finalizar la fermentación se concluyó que las temperaturas en el prototipo de acero inoxidable fueron uniformes en los distintos niveles de la masa, hubo menor interferencia de la temperatura ambiente sobre la masa fermentada, y los valores de humedad y PH coincidieron con los rangos establecidos por diferentes autores internacionales. Por otro lado en los cajones de madera se notó un gradiente significativo de temperatura en los diferentes niveles de la masa en el proceso de fermentación y, también mayor influencia de la temperatura ambiente, provocando que los granos se enfríen notablemente por las noches, disminuyendo el porcentaje de granos fermentados y con ello la calidad del mismo.

INTRODUCCIÓN

La fermentación es una etapa muy importante en el procesamiento del grano de cacao, ya que se producen cambios bioquímicos que dan origen a los precursores de aroma y sabor [1]. En la fermentación del cacao existen una serie de factores que contribuyen al resultado final de los granos fermentados; dentro de estos factores tenemos el tipo de cacao. Los diversos tipos de cacao tienen características físicas totalmente diferentes pero la forma de fermentar y los pasos para la fermentación es la misma con diferencias en el tiempo de fermentación y la frecuencia de remoción.

Otro factor importante es la frecuencia con que se realizan las remociones y el tipo de fermentación que se utiliza, los cuales pueden variar de acuerdo al volumen de producción de la finca, entre los más usados y conocidos tenemos: sacos, montones, cajones y tambor giratorio [2].

Conociendo la gran importancia que tiene la etapa de fermentación surge la necesidad de desarrollar como alternativa un fermentador que permita tener un buen grado de granos fermentados, sin alterar la calidad final del cacao. La mejora e innovación está en diseñar un prototipo para fermentar cacao que funcione de forma automática, es decir, que cuente con sensores de temperatura, sistema de remoción que permita una fermentación más homogénea y un grado de fermentación mayor al obtenido con el proceso tradicional (fermentación en cajas de madera), Además que incluya un sistema de monitoreo y control que permita llevar un registro de los parámetros medidos (temperatura y tiempo de fermentación) durante todo el proceso, con la finalidad de mejorar la calidad y producción de cacao.

DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO DISEÑADO

El diseño del prototipo de acero inoxidable se realizó en un software CAD (diseño asistido por computadora) para modelado mecánico en 3D (Solidworks), con la finalidad de hacer los estudios correspondientes y las simulaciones necesarias en cada parte del fermentador. El fermentador consta de cuatro partes principales (Figura 1)

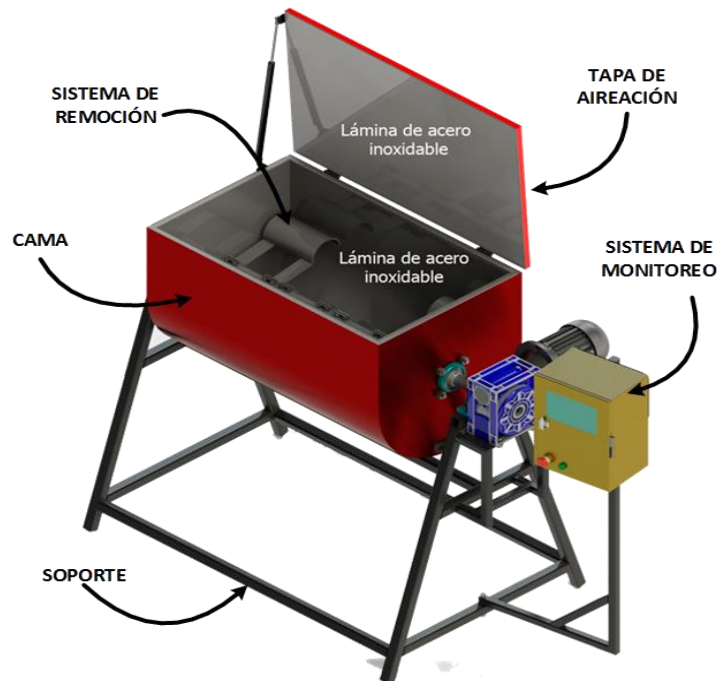


Figura 1 Partes del fermentador

El fermentador está en un inicio abierto (Figura 2 (a)), el cual se llena de granos de cacao frescos hasta el 50% de su volumen, luego se cierra la tapa para dar inicio a la fermentación; con la tapa cerrada el fermentador permanece estático para que se desarrolle la fase anaeróbica (Figura 2(b)), cuando es necesario realizar la remoción se activa un motor eléctrico que hace rotar lentamente un eje con un sistema de paletas, que permite reordenar la masa dentro de la cama del fermentador y homogenizar la temperatura en los granos; a la vez que se realiza este paso, la tapa del fermentador se levanta por un tiempo determinado para que ingrese aire fresco y expulse el CO₂, garantizando la aireación de la masa y dar inicio a la fase aeróbica (Figura 2 (c)). Luego se cierra la tapa y la masa vuelve a quedar en reposo hasta la próxima remoción (Figura 2 (d)).

Una vez concluida la fermentación, la cama debe girar 120° grados (Figura 2(e)), luego se abre la tapa y se activa el mecanismo de remoción para expulsar los granos de cacao fermentado (Figura 2(f)).

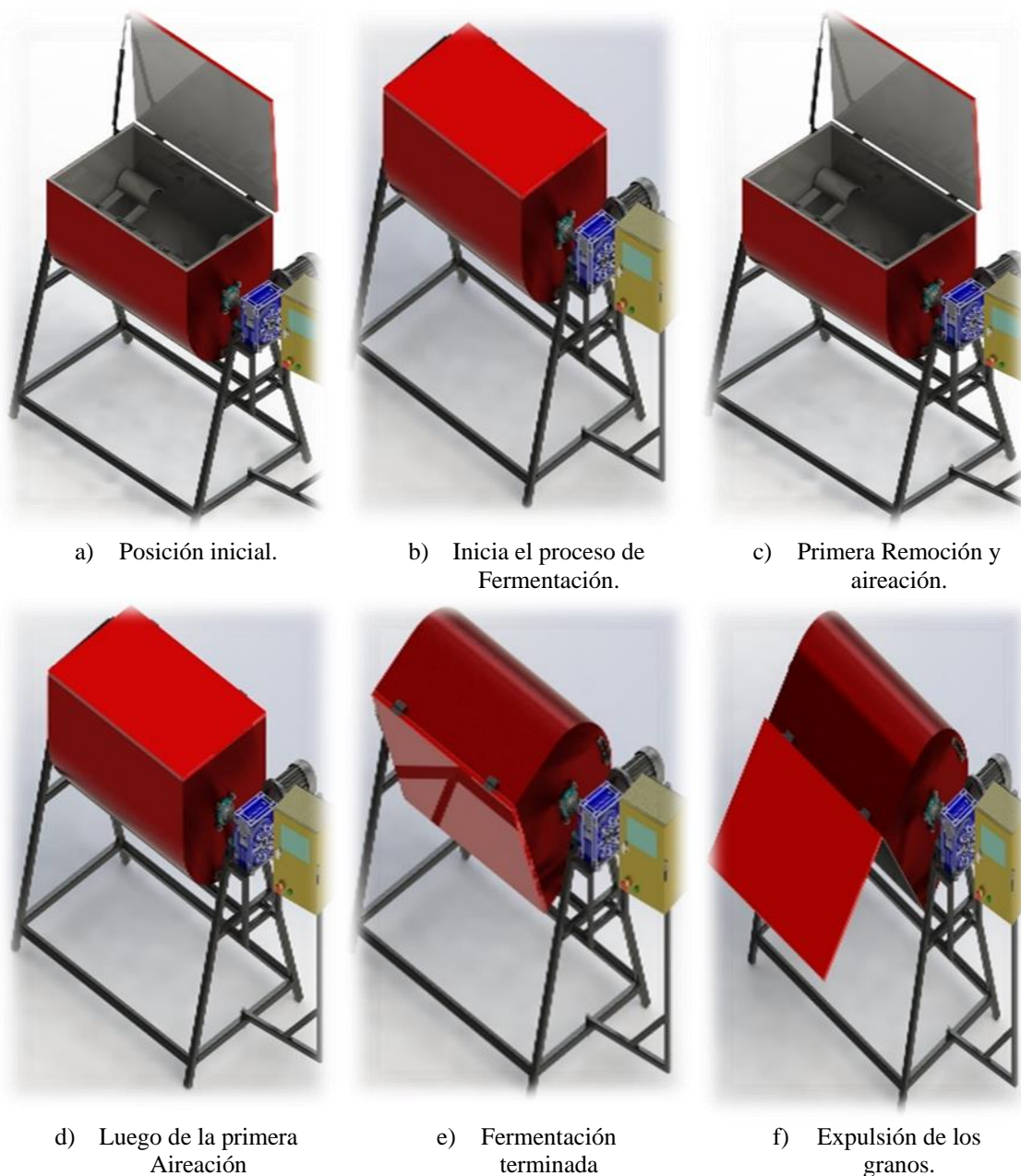


Figura 2 Funcionamiento y posiciones del fermentador.

MÉTODOS PARA OBTENER LOS PARÁMETROS A EVALUAR

- **Temperatura**

Para medir la temperatura en la masa de cacao se utilizaron 4 RTD's PT 100 de cabezal con 4 hilos ubicados en diferentes niveles del cajón y del prototipo fermentador de acero inoxidable. En el cajón fermentador se ubicó una RTD en la parte inferior, en el centro y en la parte superior; la cuarta RTD se ubicó fuera del cajón para monitorear la temperatura ambiente (Figura 3). Para el fermentador de acero inoxidable la distribución de las RTD es similar al cajón y la cuarta RTD se ubicó en la parte vacía dentro de la cama para determinar la temperatura de los gases que ahí se almacenan (Figura 4).



Figura 3 Sistema de monitoreo de temperatura en cajones de madera.



Figura 4 Ubicación de las RTD's para el monitoreo de la temperatura en el fermentador

- **Humedad**

Para determinar el contenido de humedad en los granos de cacao, se usa la norma técnica peruana ISO 2291:2006 [3, 4]. En esta investigación se utilizó un analizador de humedad Radwag PMC; este analizador sirve para indicar la humedad relativa de pequeñas muestras de diferentes materiales, para este caso es una muestra de 10 gramos de cacao (Figura 5).

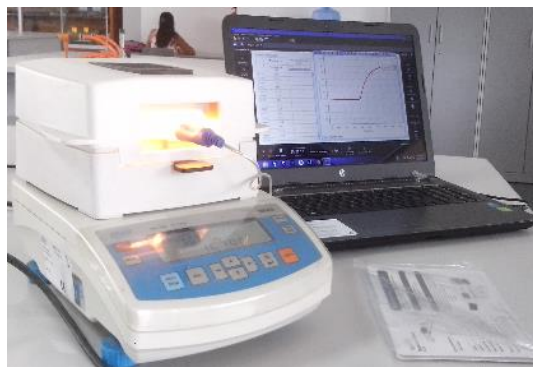


Figura 5 Analizador de humedad Radwag PMC, utilizada para medir la humedad en los granos de cacao.

Para medir la humedad se tomó muestras una vez al día durante todo el proceso de fermentación, tanto en las cajas de madera como en el fermentador de acero inoxidable.

- **PH**

Para medir el potencial de hidrógeno en el proceso de fermentación, se usa por lo general los métodos establecidos por la AOAC¹ [5], método N° 970.21; sin embargo existen otros métodos confiables como los usados por Pedro García [6] es su tesis doctoral.

Se tomó medidas del pH por separado en el mucílago y en el cotiledón, cada 24 horas durante el proceso de fermentación, las muestras se extrajeron del fondo, centro y parte superior del cajón y para el fermentador de acero inoxidable solo se extrajeron muestras del centro.

Para el mucílago se tomó aproximadamente 10 gramos de muestra y se diluyeron en 50 ml de agua destilada, se agitó con una licuadora, luego se filtró con papel Whatman #4 y se realizó la medición con un indicador de pH HANNA Instruments HI8510E (Figura 6).



Figura 6 Indicador de pH HANNA Instruments HI8510E, utilizado para medir el pH en los granos de cacao.

Para el cotiledón se procedió de forma similar que para el mucílago, tomando 50 gramos como muestra y se diluyeron en 100 ml de agua destilada.

EXPERIMENTACIÓN

El objetivo de este trabajo fue comparar los resultados de algunas variables que intervienen en el proceso de fermentación. Para ello se tomaron medidas de temperatura, humedad y pH de la masa en los cajones de madera (proceso tradicional) y en el fermentador diseñado (prototipo construido de acero inoxidable).

La fermentación tradicional se desarrolló en cajones de madera cúbicos con capacidad de 500 kilos de cacao en baba. Se realizaron tres remociones; la primera remoción se realizó después de 24 horas de iniciarse el proceso de fermentación, la segunda se hizo a las 52 horas y la tercera a las 120 horas, en total la fermentación duro aproximadamente 6 días.

Para los granos de cacao que se fermentaron en el prototipo de acero inoxidable desarrollado en la Universidad de Piura, se utilizaron lotes de 100 kilos de cacao en baba. Para poder determinar las condiciones adecuadas de fermentación en el nuevo diseño, se realizaron tres ensayos, en cada ensayo o lote fermentado se cambiaron los tiempos de remoción y las condiciones de aireación.

- **Lote 1:** La fermentación duro 8 días y medio (204 horas). La primera remoción se realizó a las 24 horas, la segunda se realizó a las 72 horas, la tercera a las 120 horas y la última a las 192 horas. Durante las 120 primeras horas el fermentador de acero inoxidable permaneció cerrado y solo se abrió para hacer la remoción.
- **Lote 2:** La fermentación duró 7 días y las remociones se realizaron cada 24 horas, después de la primera remoción la tapa del fermentador permaneció abierta y se cubrieron los granos con hojas de banano, esto facilitó la fase aeróbica del proceso.

¹ Association of the Analytical Chemists - AOAC

- Lote 3:** En el tercer lote, la fermentación duro 7 días y las remociones se realizaron cada 24 horas, después de la primera remoción la tapa del fermentador permaneció abierta y se cubrieron los granos con hojas de banano y sacos de polietileno color negro. Las remociones se realizaron a una velocidad de 7 rpm por un periodo de 3 minutos, con una frecuencia en el variador de 13 Hz.

RESULTADOS DE LA FERMENTACIÓN EN CAJAS DE MADERA

- Medidas de temperatura**

La temperatura se registró de dos formas; una de manera puntual, en la que se tomó la temperatura todos los días en los diferentes niveles del cajón (Figura 77) y la segunda forma, fue monitorear la temperatura de manera constante durante todo el proceso de fermentación (Figura 8) con un sistema de adquisición de datos desarrollado por el laboratorio de Sistemas Automáticos de Control (Universidad de Piura).

En ambas figuras las diferentes líneas de colores indican la temperatura en un nivel del cajón, tal como se indica en sus respectivas leyendas. En la Figura 8 la línea punteada de color azul indica el valor de la temperatura ambiente; esta tiene importancia en este estudio porque nos permite evaluar la interferencia que se tiene en el proceso de fermentación

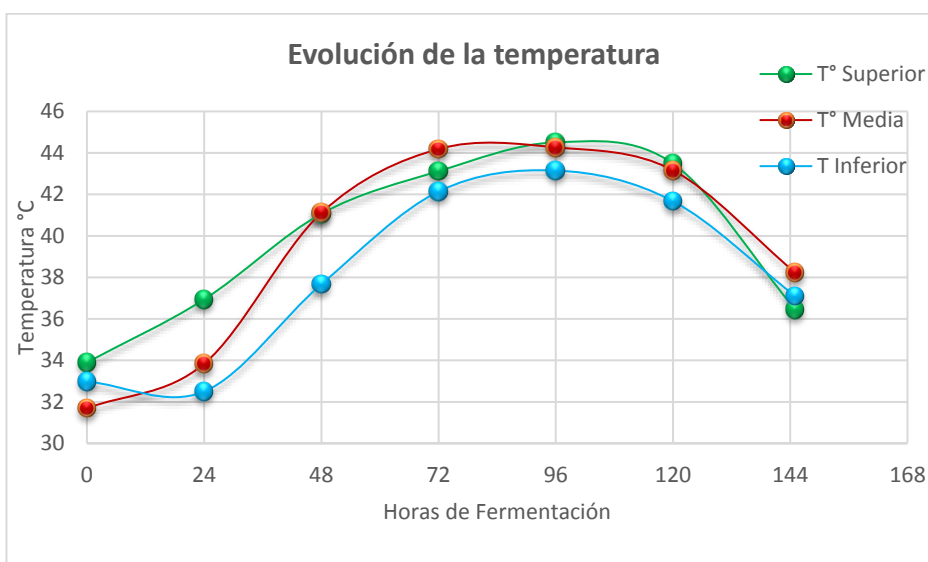


Figura 7 Evolución de la temperatura por días de fermentación en cajas de madera

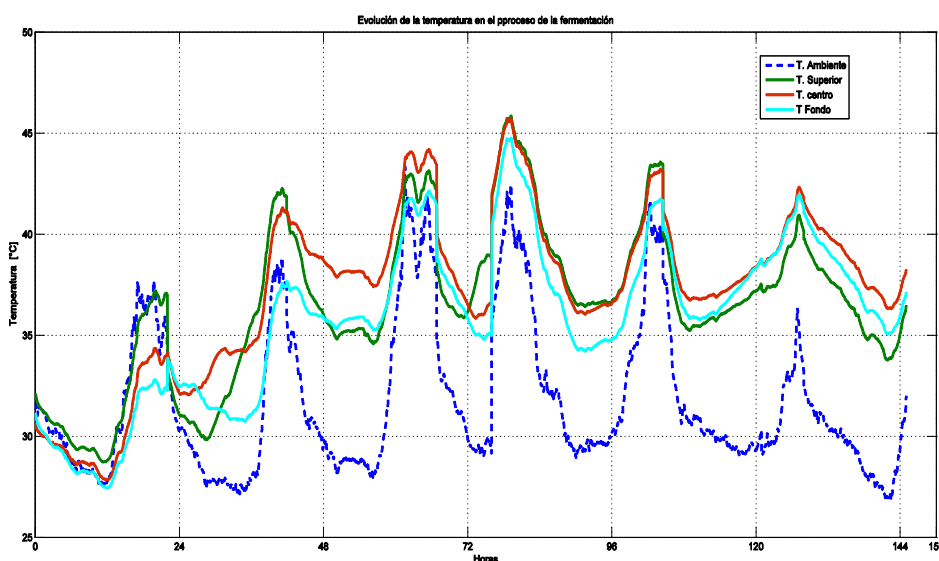


Figura 8 Evolución de la temperatura en tiempo real en cajas de madera

- **Medidas de humedad**

La humedad se midió de forma puntual, una vez al día durante todo el proceso de fermentación, y cuyos datos de humedad obtenidos durante el proceso de fermentación en los cajones, se muestra en la Figura 99.

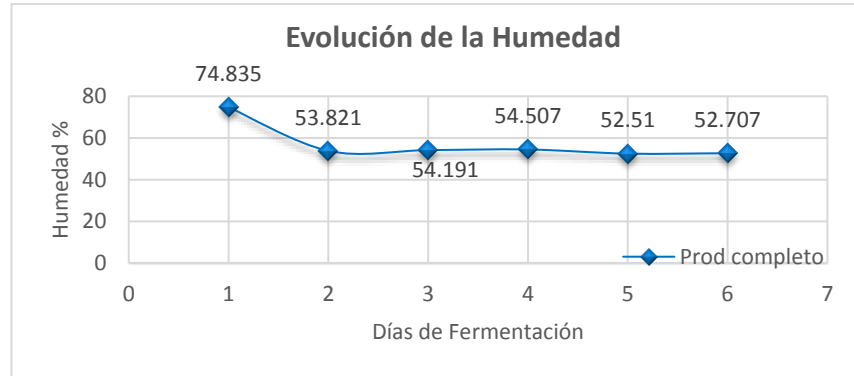


Figura 9 Evolución de la humedad en los cajones de madera.

- **Medidas de PH**

Para las medidas de PH se extrajeron muestras de los tres niveles del cajón de madera. El pH de los granos del nivel medio y del nivel inferior solo fue posible tomarlo cuando se hizo remoción de la masa, en cambio el pH de los granos del nivel superior fue tomado de forma puntual todos los días del proceso de fermentación. Los resultados para cada nivel del cajón se muestran en las figuras 10, 11 y 12.

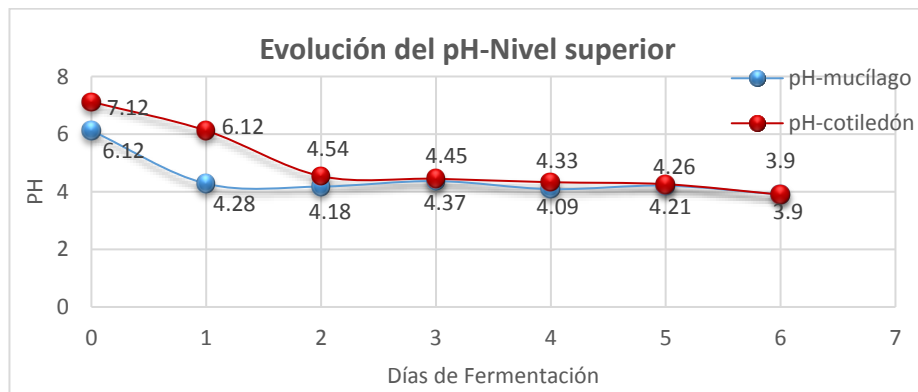


Figura 10 Medidas del pH en el nivel superior del cajón de madera.

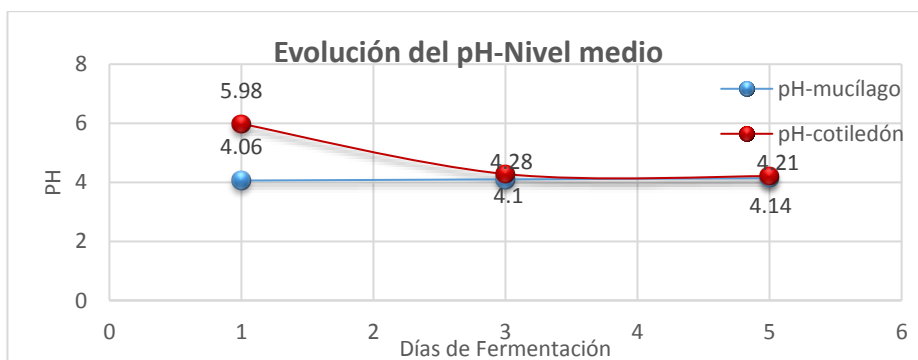


Figura 11 Medidas del pH en el nivel medio del cajón de madera.

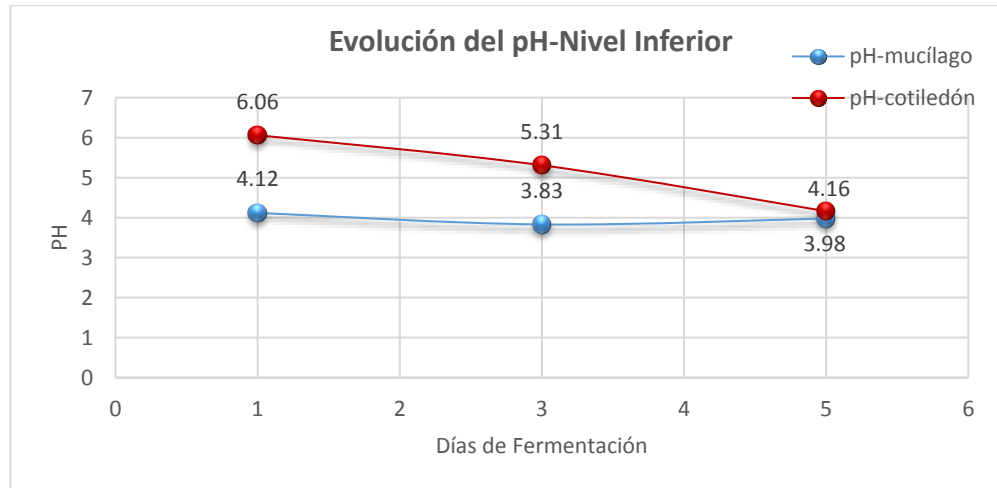


Figura 12 Medida de pH en el nivel inferior del cajón de madera.

RESULTADOS DE LA FERMENTACIÓN EN EL FERMENTADOR DE ACERO INOXIDABLE

- **Medidas de temperatura**

Los resultados de la temperatura durante todo el proceso de fermentación de los tres lotes se muestran en las figuras 13, 14 y 15. Las diferentes líneas de colores de estas figuras indican la temperatura en los diferentes niveles del fermentador, tal como indican sus respectivas leyendas.

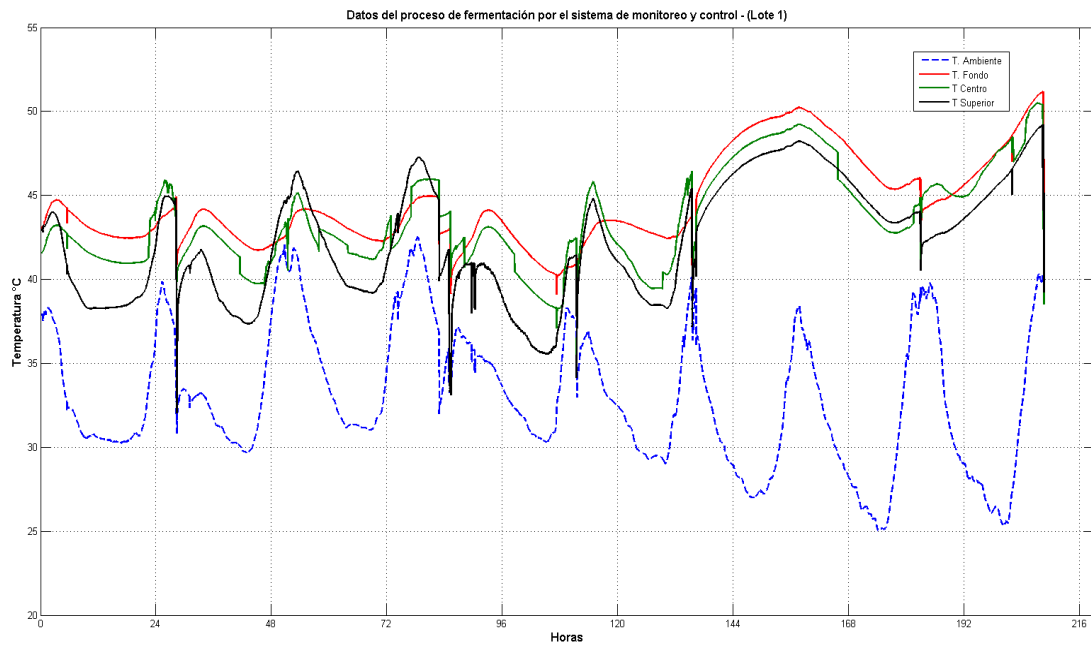


Figura 13 Evolución de la temperatura durante el proceso de fermentación – LOTE 1

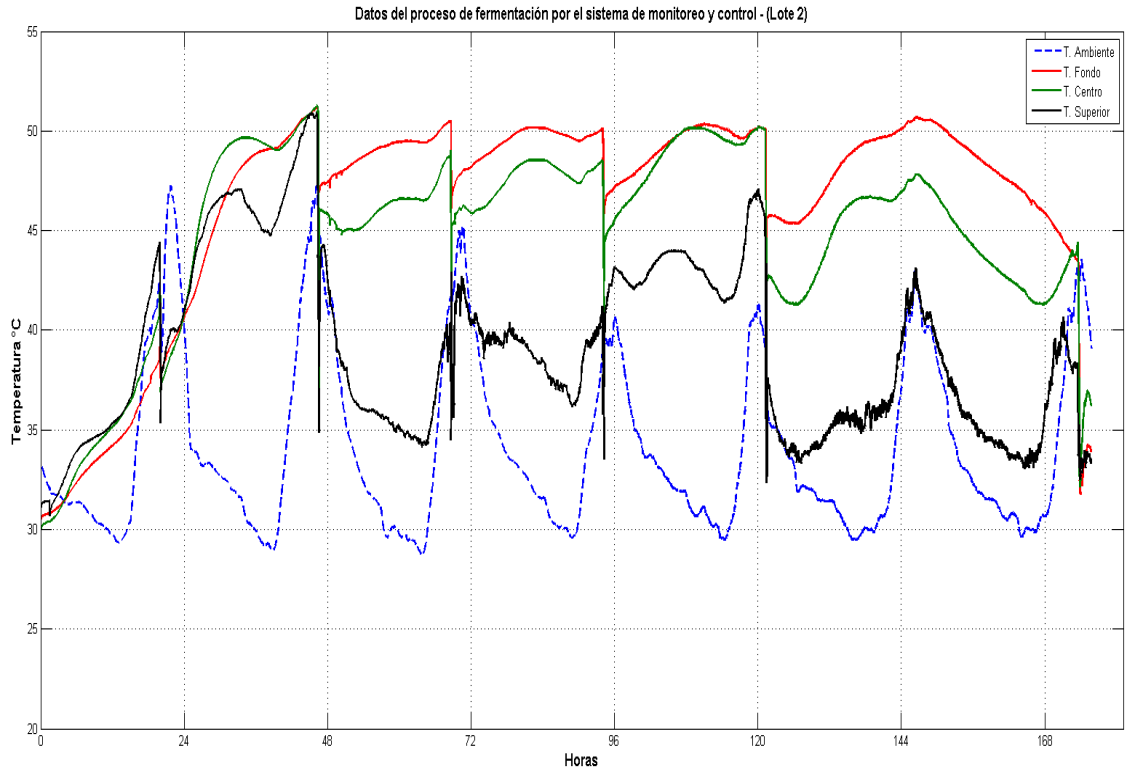


Figura 14 Evolución de la temperatura durante el proceso de fermentación – LOTE 2

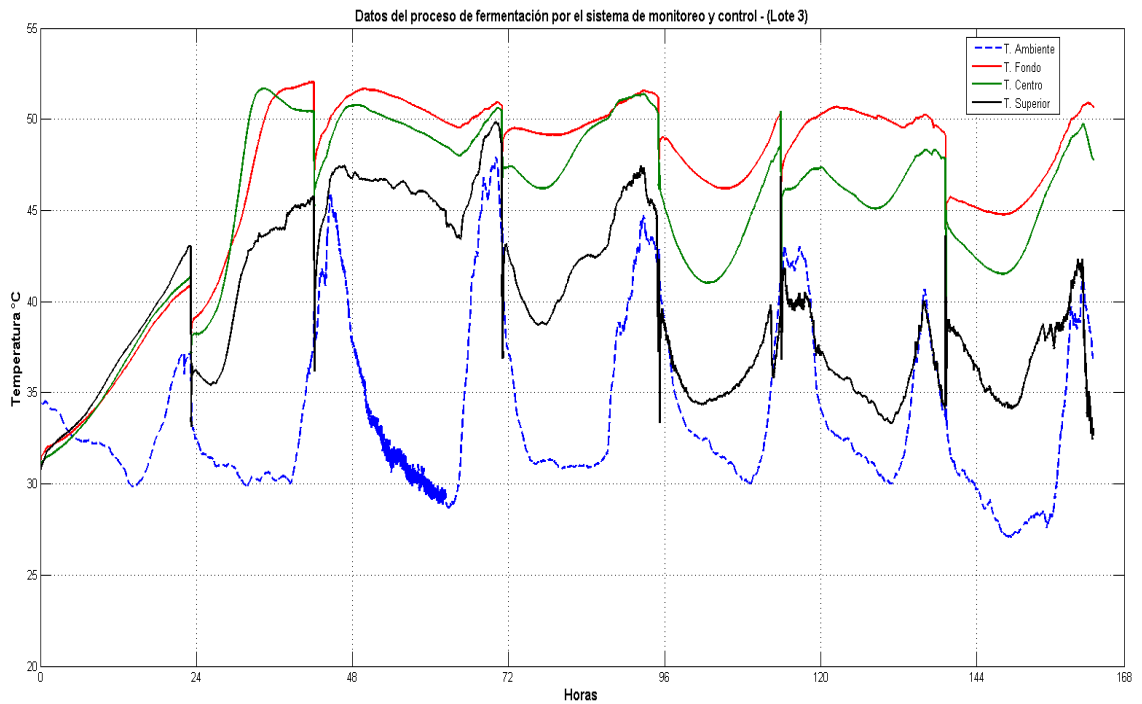


Figura 15 Evolución de la temperatura durante el proceso de fermentación – LOTE 3

- **Medidas de humedad**

Para medir la humedad se extrajeron granos del nivel medio del fermentador de acero inoxidable, estas medidas se hicieron de forma puntual una vez al día durante el proceso de fermentación. Los resultados de humedad se muestran en las figuras 16, 17 y 18.

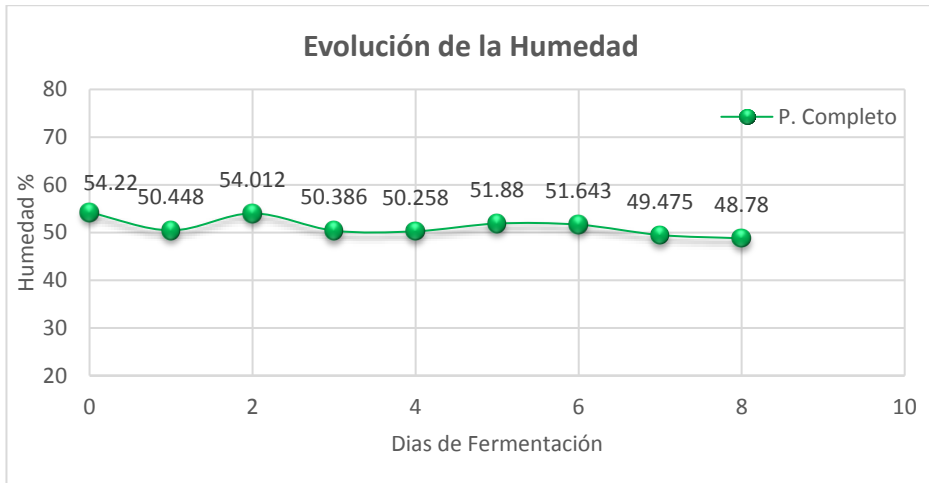


Figura 16 Evolución del humedad durante la fermentación en el fermentador – Lote 1

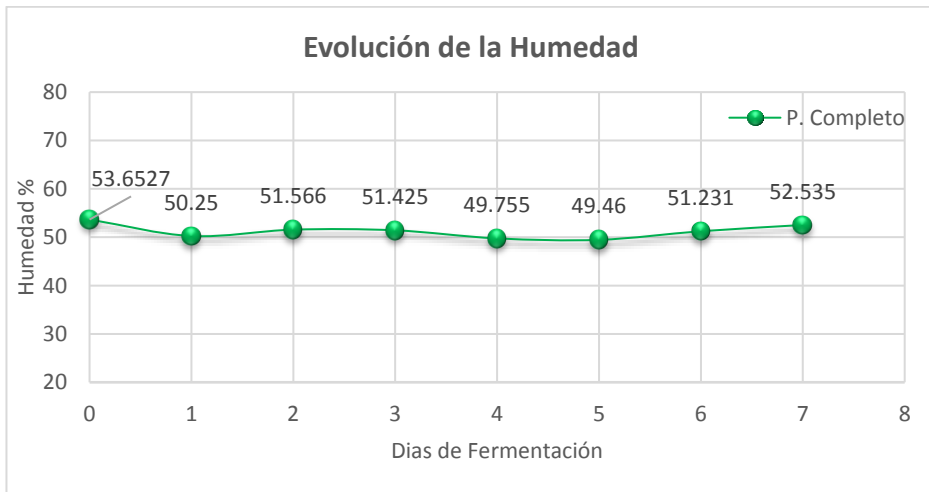


Figura 17 Evolución del humedad durante la fermentación en el fermentador – Lote 2

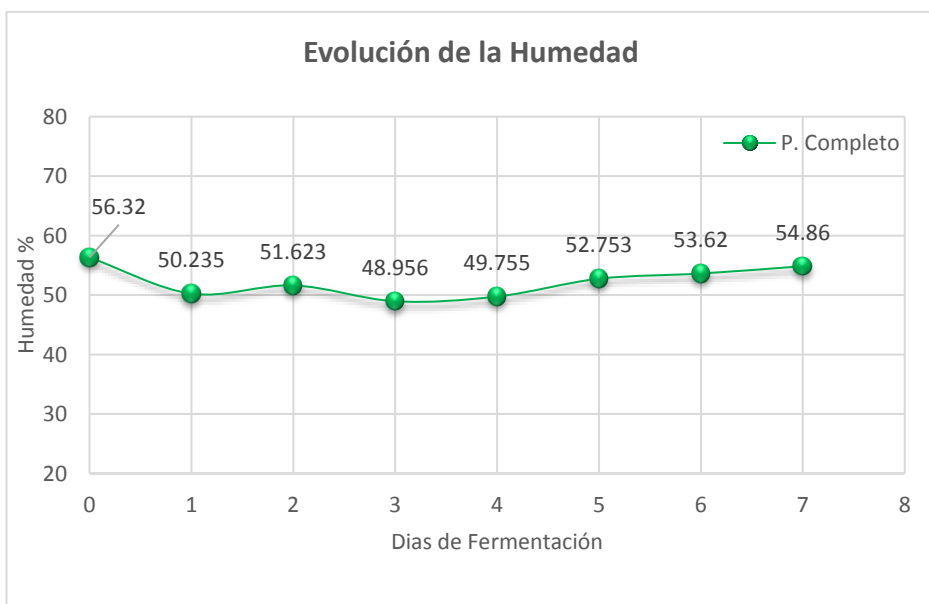


Figura 18 Evolución del humedad durante la fermentación en el fermentador – Lote 3

- **Medidas de PH**

Para las medidas del pH se extrajeron muestras del nivel medio del fermentador, estas medidas también fueron tomadas de forma puntual todos los días. Los resultados del pH medido en los tres lotes se muestran en las figuras 19, 20 y 21.

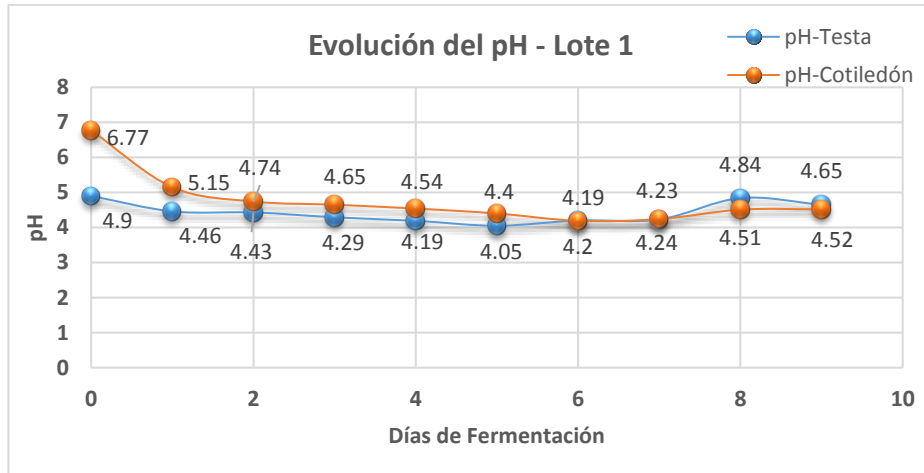


Figura 19 Evolución del pH durante la fermentación en el fermentador– Lote 1

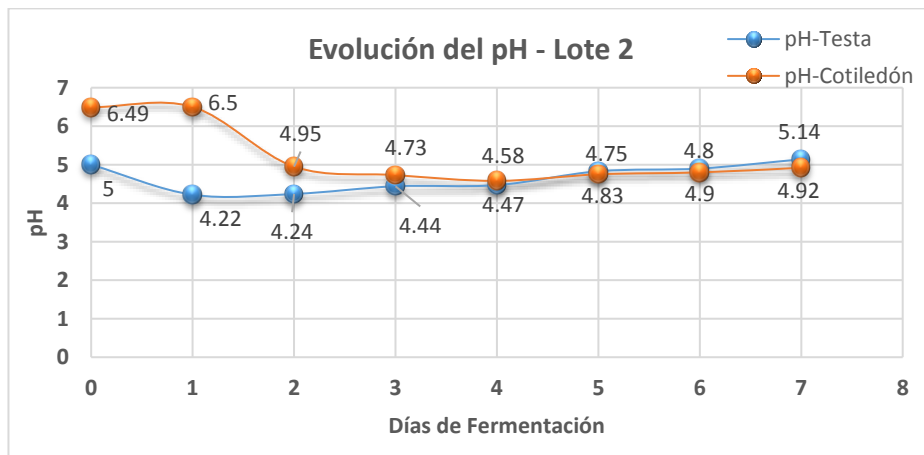


Figura 20 Evolución del pH durante la fermentación en el fermentador – Lote 2

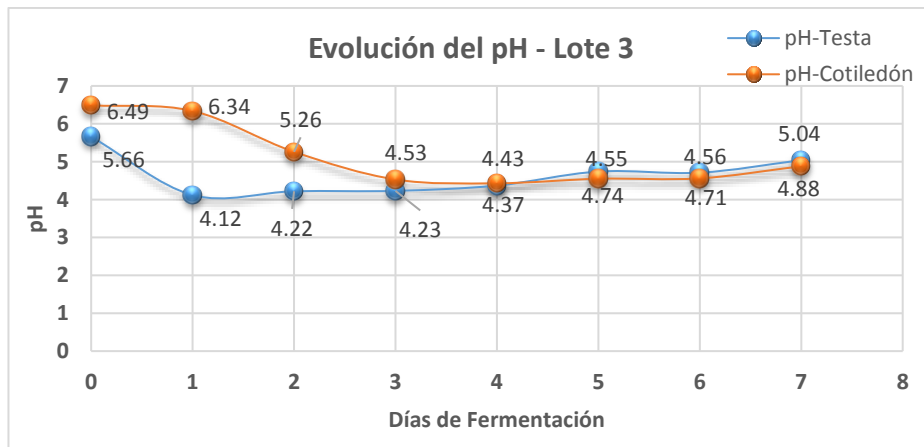


Figura 21 Evolución del pH durante la fermentación en el fermentador – Lote 3

DISCUSIÓN

• Evolución de la temperatura durante la fermentación

En este trabajo la temperatura osciló entre los 28 °C y 46° C para cajas de madera, y para el fermentador osciló entre 31 °C y 51 °C aproximadamente; en ambos tipos de fermentadores (Cajón y fermentador de acero inoxidable) los rangos de temperatura coinciden con los reportados por [6], [7] y [8].

En la Figura 8 se observa que la temperatura ambiente influye de forma negativa sobre la fermentación, dado a que al disminuir la temperatura ambiente, la temperatura en la masa también disminuye notablemente en el nivel inferior y superior. Si analizamos la temperatura en los diferentes niveles del cajón de madera, existe una diferencia notable entre estos niveles, en algunos días se presentan gradientes de temperatura de 5 a 8 °C, y esto se debe a varios factores; uno de ellos es la falta de uniformidad en las remociones de los granos, también se le atribuye esta diferencia a las perforaciones que se encuentran en el fondo del cajón, por ello es que la temperatura en el fondo es menor que la temperatura en el centro (figura 8). La temperatura en la parte central de la caja es mayor que la temperatura en los demás niveles y la temperatura de la parte superior del cajón también se ve afectada por el intercambio de calor con los alrededores. Esta variación de temperatura en los diferentes niveles genera pérdidas económicas, dado que no permite una fermentación homogénea y se generan diferentes grados de granos fermentados, y en algunos casos granos sobre fermentados.

Para el lote 3 se siguió con el protocolo basado en los datos obtenidos del lote 1 y lote 2, se hizo remociones cada 24 horas a excepción del sexto día, para verificar la influencia en la frecuencia de remoción, se dejó la tapa del fermentador cerrada por 24 horas desde el inicio del proceso garantizando la fase anaeróbica; después de las 24 horas la tapa del fermentador se mantuvo abierta para facilitar el contacto del aire con los granos, en este lote 3 los granos en proceso de fermentación se taparon con hojas de plátano.

En este lote los granos inician la fermentación con una temperatura entre 32 y 33 °C, datos cercanos a los establecidos por [1]; cuando se hizo la remoción la tapa del fermentador se dejó abierta con la finalidad de evitar la condensación del vapor generado por la elevación de temperatura en los granos. En la figura 15, se observa que la temperatura superior tiende a seguir el perfil de la temperatura ambiente a partir de las 72 horas, este hecho se debe a que el sensor encargado de medir esta temperatura deja de estar en contacto con los granos a medida que transcurren los días de fermentación; por otro lado la diferencia de temperatura entre los granos del fondo y los del centro fue menor a 2 °C, hasta antes de las 96 horas, luego la temperatura del centro tiende hacer menor que la temperatura de los granos del fondo del fermentador.

• Evolución de la humedad durante la fermentación

Los valores de humedad decrecieron en los primeros días desde 74.835 % a 53.821 %, a partir del segundo día la humedad osciló entre 53.821 y 52.707 hasta el final de la fermentación (figura 9). Estos valores a excepción del primero coinciden con los encontrados por [6] para el grano completo. Los valores de humedad encontrados en los granos fermentados en acero inoxidable se encuentran entre 56.32 y 54.86% con pequeñas variaciones alrededor de estos valores (figura 18); los valores de humedad encontrados en el prototipo de acero inoxidable, coinciden con los encontrado por [6] y [7], quienes afirman que los cambios en el contenido de humedad en los granos durante la fermentación son pequeños, comparados con los cambios que suceden en el secado.

• Evolución del pH durante la fermentación

En la figura 10, se puede notar que el pH descendió de 7.12 a 3.9 en el cotiledón, y en el mucílago el pH descendió 6.12 hasta 4.18 durante los dos primeros días, luego tiene un ligero aumento y finalmente descendiendo hasta 3.9; en general los valores del pH disminuyen y esto se debe en gran parte a que los ácidos producidos por las bacterias lácticas y acéticas se difunden al interior del grano [7]. Como resultado final en el cajón de madera se obtuvo un pH de 3.9 clasificándose como un cacao con presencia de ácidos no volátiles indeseables según [9].

Los valores de pH obtenidos en el fermentador de acero inoxidable, en el lote 3 presenta valores de pH en el cotiledón que descendieron desde 6.49 hasta 4.88, y en la testa el pH descendió desde 5.66 hasta 4.12 en el primer día y luego aumento hasta 5.04 al final de la fermentación; los valores de pH de la testa y el cotiledón coincidieron en el cuarto día, fenómeno que es común en el proceso de fermentación dado a que el pH de la testa asciende y el de los cotiledones descende (figura 21).

Los valores de pH medidos en el lote 3, define a la fermentación como buena según [9] dado que este define que el pH óptimo para un cacao de calidad debe estar entre 5.1 y 5.4; por otro lado [7] indica que un cacao con pH entre 4.75 - 5.19 es considerado como cacao adecuadamente fermentado, y finalmente [10] indica que valores alrededor de 5.0 – 5.5 conducen a un aumento del potencial aromático del cacao. Por lo tanto los valores de pH obtenidos en el fermentador de acero inoxidable clasifican a la fermentación como buena y con un aumento del potencial aromático del cacao, aunque se debe tener en cuenta que estos valores pueden verse afectados por el tipo y calidad de cacao, así como la cantidad de granos.

CONCLUSIONES

Al monitorearse la temperatura en tiempo real en los cajones de madera, se notó que existe un gradiente de temperatura entre los diferentes niveles del cajón y que la temperatura ambiente influye en la temperatura de los granos, dado a que la temperatura de los granos disminuye notablemente en el transcurso de la madrugada y luego aumenta alcanzando los valores más altos en los picos de la temperatura ambiente. Para la fermentación en el prototipo de acero inoxidable el gradiente de temperatura en los diferentes niveles de la masa fue 5 veces menor en los diferentes niveles de la masa y la temperatura ambiente tuvo poca influencia en la temperatura de los granos.

En los cajones de madera se observó gran dificultad para mover la masa de granos de cacao de un cajón a otro. En el prototipo de acero inoxidable las remociones se realizan mediante paletas que giran a 7 RPM lo que facilita las remociones de grandes cantidades. Por otro lado se observó microflora en los cajones producto de la fermentación, esto origina malos olores que perjudican el proceso de fermentación, este hecho no se observó en el prototipo de acero inoxidable, además este prototipo tiene la ventaja de poder recolectar el mucilago segregado durante el proceso de fermentación, dado que tiene un sistema de drenaje que permite recolectarlo.

Los resultados obtenidos en el prototipo de acero inoxidable y en el cajón de madera, coinciden con los encontrados en las diversas bibliografías, por lo que el prototipo de acero inoxidable es considerado como una nueva alternativa para llevar a cabo el proceso de fermentación de cacao desarrollando el interés de usar prácticas de producción más higiénicas en bioprocesos industriales.

El prototipo de acero inoxidable contempla la parte de monitoreo y control, que está basada en sistemas embebidos y permite llevar una trazabilidad y adquisición de datos en tiempo real de todo el proceso de fermentación realizados por la asociación de productores de cacao. Este sistema también permite el monitoreo remoto del proceso de fermentación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC), a la Universidad de Piura por impulsar la investigación, el desarrollo tecnológico y la competitividad del país para el mundo y a la Asociación de Productores de Banano y Cacao Orgánico – ASPROBO por brindar sus instalaciones para las mediciones durante el proceso de fermentación de cacao.

Este trabajo se llevó a cabo dentro del Proyecto Círculo de Investigación: “Desarrollo, mejoramiento y difusión de tecnologías para el proceso de fermentación, secado solar y conservación del germoplasma del cacao, en Piura y Jaén-Cajamarca y difusión en otras regiones o cadenas productivas (Contrato: N° 013 – 2014 - FONDECYT)”.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] R. F. Schwan y G. H. Fleet, "Cocoa and coffee fermentation (Fermented food and beverages series)", EE.UU: Taylor & Francis Group, 2015.
- [2] G. Ramos, «"La fermentación, el secado y almacenamiento del cacao",» de *Taller internacional de calidad integral de cacao, teoría y práctica*, Quevedo-Ecuador, 2004.
- [3] M. Guitérrez Seijas, «Prácticas de Control de Calidad de Cacao en Centro de Acopio,» Piura, Gobierno Regional, Agosto 2007, p. 6.
- [4] C. Stevenson, J. Corven y G. Villanueva, «Manual para análisis de cacao en laboratorio,» de *IICA-Procacao*, San Jose, Costa Rica, Miscelaneas, Marzo 1993, p. 20.
- [5] ASSOCIATION OF THE ANALYTICAL CHEMISTS, «Official methods of analysis,» de *AOAC*, vol. 16 th Edition, Maryland - USA, 16th Edition Gaithersburg, 1997, p. 17 Cap 31.
- [6] P. García Alamilla, Caracterización microbiana, bioquímica y cinética del proceso de fermentación tradición durante el beneficio del cacao, México: Universidad Autónoma Metropolitana, 2000.

- [7] J. Rodríguez Campos, «Estudio de los volátiles de Theobroma cacao L, durante el proceso tradicional de fermentación de cacao,» Instituto Politécnico Nacional, México, 2011.
- [8] G. Vinícius, K. Teixeira y E. Gonzaga, «Spontaneous cocoa bean fermentation carried out in a novel-design stainless steel tank: Influence on the dynamics of microbial populations and physical-chemical properties» *International Journal of Food Microbiology*, vol. 161, pp. 121-133, 2012.
- [9] A. Arjimos, «Caracterización de acidez como parámetro químico de calidad en muestras de cacao (Theobroma cacao L) fino y ordinario de producción nacional durante la fermentación,» Pontificac Universidad Católica, Quito-Ecuador, 2002.
- [10] E. Portillo, L. Graziani de Fariñas y E. Betancourt, Análisis químico del cacao criollo Porcelana (Theobroma Cacao L) en el sur del lago de Maracaibo, Venezuela: Universidad Central de Venezuela, 2007.