

PERFILES DE FERMENTACIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL CACAO (*Theobroma cacao* L.) DE LA ECORREGIÓN DE LACHUÁ, COBÁN, ALTA VERAPAZ

Marlon Ac-Pangan
marlon@bepsisa.com,

Edgar Armando Ruiz Cruz
earuizcruz@yahoo.es

Centro Universitario del Norte
(CUNOR), USAC

RESUMEN

Dentro de la industria del cacao, la comercialización de granos a nivel global representa la segunda actividad comercial que genera mayor valor, solo después de la comercialización de chocolate y sus derivados. La experiencia guatemalteca de exportación ha tenido buena aceptación a nivel internacional, sin embargo, pocos avances se han realizado en el proceso de fermentación para el mejoramiento de la calidad. Se realizó la caracterización y una propuesta de un nuevo método para el monitoreo de la fermentación en tres masas y tres localidades diferentes. Los resultados mostraron que, en promedio, en la región de Lachuá el proceso de fermentación finaliza al sexto día de procesamiento cuando la temperatura alcanza un valor de 48.02°C y el pH de la testa y del cotiledón coinciden con un valor de pH de 4.50. Sin embargo; los resultados también mostraron que los perfiles de fermentación dependen de la localidad y masa de procesamiento. Además, se observó una moderada correlación lineal positiva (0.547) entre temperatura de fermentación y pH de la testa y alta correlación lineal negativa (-0.826) entre temperatura de fermentación y pH del cotiledón. Los protocolos utilizados actualmente en la ecorregión de Lachuá pueden ser mejorados y ajustados de acuerdo con la masa de cacao en fermentación y la localidad de procesamiento, basados en los perfiles de temperatura y pH de la testa y del cotiledón. Además, los resultados sugieren que es posible utilizar la temperatura de la masa de fermentación como un indicador para el monitoreo de los perfiles de pH durante la fermentación.

PALABRAS CLAVE: Cacao, Calidad, Fermentación, Desarrollo Rural, Cadena de Valor, Postcosecha.

ABSTRACT

FERMENTATION PROFILES TO IMPROVE COCOA (*Theobroma cacao* L.) QUALITY IN LACHUÁ, COBÁN, ALTA VERAPAZ

Cocoa beans trade represents the second most important commercial activity within the cocoa value chain Worldwide, which generates more profit only after commercialization of chocolate and related products. The international trade of cocoa beans has been successful for small farmers in Guatemala; however, limited advances have been implemented on cocoa beans fermentation to increase quality. In the present study, a characterization, and the proposal of a new method for monitoring the cocoa fermentation process was performed. Results demonstrated that, on average, cocoa fermentation should last six days, when mass temperature reaches 48.02°C and pH value of the testa and cotyledon coincides at 4.50. However, results also demonstrated that fermentation performance depends on processing location and fermentation mass. In addition, it was observed a moderate

positive linear correlation between fermentation temperature and pH of the testa (0.547). On the other hand, a high negative linear correlation was observed between fermentation temperature and pH of the cotyledon (-0.826). Current fermentation protocols employed by cocoa farmers in Lachua could be improved and adjusted depending on fermentation mass and processing location based on temperature profiles, pH of the testa and the cotyledon. The results suggest that it is possible to use fermentation mass temperature as indicator of pH performance during cocoa fermentation.

KEYWORDS: Cocoa, Cacao, Quality, Fermentation, Rural Development, Value Chain, Postharvest.

INTRODUCCIÓN

La historia del cultivo de cacao en Guatemala ha permitido que este sea parte de las actividades agrícolas de subsistencia y de producción excedentaria en diferentes partes del país, principalmente en comunidades indígenas cercanas a parques nacionales, reservas naturales o áreas de recarga hídrica. La principal forma de comercializar cacao es a través del grano seco de cacao en sus distintas presentaciones. Este flujo comercial a nivel global representa la segunda actividad económica más importante que genera mayor valor solo después de la comercialización del chocolate y sus derivados (Salguero, 2015).

Respecto al grano de cacao, la experiencia guatemalteca de exportación es relativamente reciente, accedió primero en el año 2002 a El Salvador y a partir del año 2008 al mercado de Estados Unidos, con un incremento marcado en el año 2013 cuando grupos de productores de la Fundación Laguna Lachúa (FUNDALACHUA) y la Federación de Cooperativas de las Verapaces (FEDECOVERA) iniciaron sus exportaciones principalmente a Estados Unidos (Agrocadena de Cacao de Guatemala [ACG], 2016).

Según ACG (2016), de acuerdo con los ingresos reportados de productores que están exportando o vendiendo su producto, semilla de cacao, el precio por tonelada métrica 1,000 kg (22 quintales) a nivel nacional oscila entre \$ 2,800.00 a \$ 3,500.00. Con relación a la venta de producto para exportación, el precio por tonelada oscila entre \$ 3,500.00 a \$ 4,300.00. Si consideramos que cada familia pueda producir media tonelada al año, sus ingresos reportados serían en promedio \$ 1,400.00 anuales tomando el precio inferior reportado o su equivalente en moneda nacional de Q 11,200.00 anuales. Logrando tan solo esta mínima producción, mejoraría significativamente los ingresos económicos de las familias productoras, convirtiéndose en un medio principal para mejorar la calidad de vida de las personas en el área rural en estricto apego a la Política Nacional de Desarrollo Rural Integral (PNDR).

En la región Norte de Guatemala a pesar de haber iniciado con la experiencia en exportación de cacao al mercado de Estados Unidos, la mayor parte del producto todavía se comercializa a intermediarios en ciudades como San Pedro Carchá, Cobán y ciudad de Guatemala y estos a su vez comercializan principalmente con la industria artesanal de productores de chocolate en el municipio de Mixco, Quetzaltenango y Antigua Guatemala. Debido a la fuerte presencia de industrias artesanales y al alto nivel de consumo interno, la comercialización de cacao lavado o con bajos estándares de calidad sigue siendo una opción de comercialización. Esto se debe a que la mayoría del cacao comercializado para el mercado local se utiliza para la elaboración de bebidas a base de chocolate, para el cual no se requiere de cacao con altos estándares de calidad ya que el producto contiene altos niveles de azúcar y esto contribuye a que los defectos de los granos no sean percibidos por el mercado o por los consumidores.

Durante varios años, la cadena de valor del cacao en el eslabón de procesamiento no ha presentado avances en temas relacionados al mejoramiento del manejo postcosecha de los granos del cacao, lo cual ha provocado que el producto presente inestabilidad en el precio relacionado a la calidad variable e inconsistente. Según Say y Villalobos (2012) los precios de cacao (fermentado o lavado) variaron de Q750.00 a Q1,000.00 por quintal en el año 2,007 y de Q650.00 a Q1,400.00 por quintal para el año 2,012. Esta variabilidad en el precio del producto en el mercado fue confirmada posteriormente por Ochoa (2015), quien reportó el precio de cacao en un rango de Q700.00 a Q 1,350.00 por quintal de cacao dependiendo del área de producción y la calidad de los granos de cacao.

Por otro lado, según Ruiz (2015) en la región Norte de Guatemala, principalmente en los departamentos de Alta Verapaz, Quiché y Petén se han identificado tres modelos de procesamiento, los cuales varían en calidad del producto

y requerimiento de infraestructura. El producto con mayor oferta en la región es el cacao lavado, el cual posee un ligero secado del grano y ningún tipo de fermentación. Esta práctica poco recomendada que ha sido ampliamente utilizada por la mayor parte de los productores de cacao es lo que ha dificultado acceder a mercados de alto valor. A pesar de que algunas asociaciones cuentan con infraestructura básica para la fermentación y el secado del cacao y cuentan con equipo para la medición de parámetros como temperatura y humedad del grano, no ha sido posible desarrollar un procedimiento de fermentación y secado adecuado debido al desconocimiento sobre los parámetros y factores que son necesarios para lograr un procesamiento adecuado. Actualmente, en la región de estudio no se cuentan con

investigaciones relacionadas al desarrollo de perfiles de fermentación de cacao basados en la mezcla genética, condiciones micro climáticas o características de los centros de procesamiento de la región.

El objetivo del presente estudio fue establecer perfiles de fermentación de cacao para la producción de cacao fino de aroma en la ecorregión de Lachuá, como mecanismo para contribuir con el desarrollo rural del municipio de Cobán, Alta Verapaz; mediante el incremento de la calidad y consistencia del producto a lo largo de la cosecha y en diferentes años de cosecha, con la finalidad de acceder a nichos de mercado de alto valor y obtener mejores ingresos económicos de las familias productoras de cacao.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del estudio

La investigación se realizó con productores de cacao miembros de la Fundación Laguna Lachuá (FUNDALACHUA) cuya sede se encuentra ubicada en la comunidad Salacum en el municipio de Cobán, Alta Verapaz, en la ecorregión de Lachuá.

FUNDALACHUA está conformada por 394 familias productoras de cacao (301 hombres y 93 mujeres), las cuales pertenecen a las asociaciones KATBALPOM que abarca las comunidades de Salacum y Saholom, ASOSELNOR ubicada en la comunidad de Faisán I y II y Pataté; y ASODIRP en la comunidad Rocjá Pomtilá.

Cosecha y acopio de cacao

Para el desarrollo de la investigación se utilizó la producción de frutos de cacao de la ecorregión de Lachuá de la cosecha 2017-2018. Los frutos fueron recolectados de las parcelas de familias productoras de cacao miembros de las asociaciones: ASODIRP, KATBALPOM y ASOSELNOR. Se establecieron días específicos de cosecha de cacao cada siete o 15 días dependiendo de la época para garantizar una masa de acopio adecuado para el estudio. Se cosecharon los frutos totalmente maduros y libres de enfermedades o daños por animales, para evitar inconvenientes en la fermentación, luego se procedió a la extracción de las semillas frescas y se colocaron en sacos de polipropileno para drenar la baba del cacao durante cuatro horas y eliminar el exceso de agua presente en el jugo del cacao.

Fermentación

La fermentación se desarrolló en las instalaciones de cada una de las asociaciones presentes en la región de estudio. Se utilizaron cajas construidas de madera con una dimensión de 80 x 100 x 100 cm y una capacidad de 12 quintales de cacao en fresco. Para el diseño del experimento se adaptó el método utilizado por Hernández Hernández et al. (2016), el cual consistió en utilizar tres diferentes masas de fermentación en diferentes localidades en México. En el caso de la presente investigación las masas de cacao a fermentar fueron de: cinco, ocho y once quintales de cacao en fresco. Se realizaron cuatro repeticiones en cada localidad de procesamiento.

Monitoreo de variables de fermentación

Las variables evaluadas durante la fermentación fueron: a) temperatura y humedad relativa del área de fermentación, las cuales se midieron utilizando un termohigrómetro modelo HTC-1 AC Scientific (Interlab Equipo y Cristalería, Guatemala); b) temperatura general de la masa en fermentación, utilizando un termómetro digital modelo WT-2 de -50 a 300°C con sonda/AS Scientific, sonda de acero inoxidable, resolución de 0.1°C (Interlab Equipo y Cristalería, Guatemala). Se realizaron mediciones de temperatura en la masa en fermentación según lo recomendado por Ali et al. (2016), que consistió en realizar mediciones en la parte alta, media y baja para determinar las diferencias en temperatura a lo largo de la masa, realizando las mediciones en triplicado; c) pH de la de la testa y del cotiledón utilizando el medidor de pH modelo HI-98127-pHep®4 (Hanna Instruments,

Guatemala). La medición del pH consistió en medir el pH de la masa de fermentación en tres diferentes lugares para obtener un valor representativo. Para la medición del pH de la testa y del cotiledón se tomó una muestra de 20 granos de cacao de diferentes partes de la masa de fermentación para obtener una muestra representativa (Hernández Hernández et al., 2016). Luego se tomaron tres granos de la muestra recolectada y utilizando una navaja se cortaron longitudinalmente para separar el cotiledón de la testa y se colocaron por separado en un mortero de porcelana de 60 ml y se agregó 10 ml de agua desionizada y se procedió a macerar hasta disolver totalmente el cotiledón y la testa en cada uno de los morteros. Luego utilizando el medidor de pH se realizó la lectura de las muestras en cada uno de los morteros, este procedimiento se realizó en triplicado, es decir se utilizaron nueve granos por cada muestreo para hacer las mediciones, de esta manera se obtuvieron tres lecturas

diferentes y luego el valor utilizado para el análisis fue el promedio de las mediciones de la muestra (Ali et al., 2016).

Diseño experimental

Se utilizó un arreglo factorial (3x3) con una distribución en bloques al azar y medidas repetidas en tiempo (días de fermentación). El modelo experimental contó con dos factores: a) masa de fermentación: 5, 8, y 11 quintales de cacao fresco y b) localidad: KATBALPOM, ASODIRP y ASOSELNOR.

Análisis estadístico

Para el análisis de los resultados se utilizó el programa estadístico R Studio (4.1.1), en el cual se realizó análisis de varianza, separación de medias Tukey HSD, análisis de correlación, regresión lineal y no lineal. El análisis estadístico se realizó utilizando un nivel de significancia de 0.05.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del análisis de varianza mostraron que los factores que fueron significativos ($p \leq 0.05$) en la variable temperatura ambiente del área de fermentación fueron localidad y día de fermentación. En la interacción de factores se observó que la única interacción significativa para la variable temperatura ambiente del área de fermentación fue la interacción entre localidad y masa de fermentación (Cuadro 1). Para la variable humedad relativa, los factores con significancia estadística fueron localidad, masa, y día de fermentación; así como la interacción entre localidad y masa de procesamiento.

El análisis de varianza para la variable temperatura de fermentación mostró que los factores significativos fueron localidad, masa, y día de fermentación; así como las interacciones de localidad y masa, localidad y día, y masa y día de fermentación (Cuadro 1). Para la variable pH de la testa mostraron diferencia significativa los factores localidad, masa, y día de procesamiento (Cuadro 1). Además, se observó significancia en la interacción de factores de localidad y masa, localidad y día de fermentación. Los factores que presentaron valores significativos para la variable de pH del cotiledón fueron localidad y día de fermentación; y la

Cuadro 1. Probabilidades de los valores F del análisis de varianza para las variables ambientales del área de procesamiento y de fermentación de cacao.

Factor	Temperatura ambiente		Humedad ambiente		Temperatura de fermentación		pH de la testa		pH del cotiledón	
	Valor F	Sig.	Valor F	Sig.	Valor F	Sig.	Valor F	Sig.	Valor F	Sig.
Localidad	58.25	0.000	88.77	0.00	21.98	0.00	27.21	0.00	30.77	0.00
Masa	0.10	0.905	3.82	0.02	6.41	0.00	13.54	0.00	0.66	0.52
Día	2.21	0.028	2.46	0.01	180.06	0.00	46.00	0.00	185.16	0.00
Localidad x masa	4.24	0.002	5.48	0.00	5.62	0.00	6.27	0.00	10.97	0.00
Localidad x día	0.88	0.598	1.13	0.32	4.36	0.00	6.57	0.00	8.21	0.00
Masa x día	0.602	0.881	0.52	0.93	2.10	0.01	0.88	0.59	2.82	0.00
Localidad x masa x día	0.580	0.967	0.47	0.99	1.10	0.33	1.42	0.08	0.84	0.72

interacción de factores entre localidad y masa, localidad y día, y masa y día de fermentación.

Temperatura y humedad relativa del ambiente de procesamiento

El promedio de temperatura ambiente del área de fermentación para la ecorregión fue de 35.74°C, con un valor mínimo de temperatura de 25.6°C reportado en ASODIRP y el valor máximo de 55.07°C reportado en KATBALPOM. La temperatura ambiente del área de fermentación en la asociación KATBALPOM fue significativamente superior durante todos los días de procesamiento. Por otro lado; las otras dos asociaciones (ASODIRP y ASOSELNOR) presentaron comportamientos similares. En general, se observó un ligero incremento en la temperatura ambiente del área de fermentación conforme avanzaba el proceso. Esta tendencia de incremento de la temperatura ambiente del área de fermentación en los últimos días de procesamiento también fue reportada previamente por Hernández Hernández et al. (2016) y Papalexandratou et al. (2011) en México y Brasil. La temperatura ambiente del área de procesamiento es un parámetro importante en el proceso de fermentación de cacao, debido a que es un indicador de la capacidad de la infraestructura de retener el calor generado durante la fermentación (Wood, 2001). Las instalaciones que no son aisladas adecuadamente no permiten la conservación del calor generado durante este proceso, lo cual impacta en la calidad de la fermentación (García González et al., 2019). Umaña Calderón (2013) reportó deficiencia en el perfil de temperaturas de la masa de fermentación debido al efecto de las bajas temperaturas ambientales (20-23°C) durante el procesamiento y el diseño deficiente de las instalaciones de fermentación, resultando en una mala calidad del producto final.

La interacción entre los factores localidad y masa de procesamiento fue significativa para la variable temperatura ambiente. Este parámetro fue superior en la asociación KATBALPOM independientemente de la masa de procesamiento (5, 8 y 11 quintales), con valores de 41.58, 38.06 y 40.17°C respectivamente. En las otras dos localidades (ASODIRP Y ASOSELNOR) no existió diferencia significativa entre el procesamiento de diferentes masas (Cuadro 2). Esta variable presenta la misma tendencia que la temperatura de la masa de fermentación, donde KATBALPOM también reportó mayores valores de temperatura en las tres masas (Cuadro 3), lo cual indica que los valores de temperatura del área de procesamiento están estrechamente relacionados a la temperatura generada por la fermentación.

Los altos valores de temperatura ambiente del área de fermentación reportados en KATBALPOM pueden ser causados por el diseño y localización del área de procesamiento, el cual permite mejor retención del calor generado durante el

proceso. Las tres asociaciones se encuentran dentro de la misma ecorregión de Lachuá, lo cual hace poco probable que exista una diferencia significativa en la temperatura del ambiente (microclima) entre las tres comunidades. Según el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), la temperatura ambiente para la ecorregión de Lachuá es de 25.3°C (Medina Müller, 2012). Por lo tanto, las diferencias en la temperatura del área de procesamiento de cacao en las diferentes comunidades, puede estar más relacionadas a los factores de diseño del área de procesamiento y la masa total en fermentación.

El promedio general de humedad relativa del área de procesamiento en la ecorregión fue 59.36%. Los resultados de la separación de medias Tukey mostraron que el tercer día de fermentación presentó el promedio más alto de humedad relativa con 64%, coincidiendo con la máxima pérdida y drenaje del mucílago de cacao durante la fermentación. De acuerdo con Wood (2001), durante las primeras 24-36 horas se produce la pérdida del mucílago de cacao debido a efectos de gravedad, efectos mecánicos y la acción de los microorganismos. El líquido del mucílago drena en la parte inferior de las cajas de fermentación, lo cual puede incrementar la humedad del área de procesamiento si esta no está diseñada con drenaje adecuado. El promedio de humedad relativa más bajo fue de 55%, el cual se reportó al quinto y sexto día de fermentación. El monitoreo de la humedad del área de procesamiento es importante ya que es un reflejo de los cambios que ocurren durante la fermentación, principalmente debido a la pérdida de agua de los granos de cacao durante el proceso. El 40% del peso de los granos frescos de cacao corresponde al mucílago, y esta a su vez está conformado principalmente por agua (82-87%) (Afoakwa, 2016b; Amoa-Awua, 2015).

La separación de medias para la variable humedad relativa por tratamiento (Localidad x Masa) mostró que la asociación ASODIRP y ASOSELNOR presentaron los valores más altos de humedad relativa durante el procesamiento de 5 y 11 quintales de cacao (Cuadro 2). Por otro lado; ASODIRP reportó el valor más alto durante el procesamiento de 8 quintales, con 71%, el cual fue el mayor valor en todos los tratamientos. En KATBALPOM el porcentaje más bajo fue reportado durante el procesamiento de 11 quintales, en ASOSELNOR durante la fermentación de 8 quintales y en ASODIRP al fermentar 5 y 11 quintales de cacao (Cuadro 2).

Parámetros de fermentación

• Temperatura

La temperatura de fermentación en promedio para la ecorregión de Lachuá fue de 43.72°C. La interacción de los factores de localidad y masa de fermentación fue significativa en el análisis de varianza. Esto refleja la variabilidad del procesamiento de cacao en la región, en función de la masa

Cuadro 2. Separación de medias¹ y DE² para las variables temperatura ambiente y humedad relativa del ambiente del área de procesamiento según localidad y masa de fermentación.

Localidad	Masa de Cacao en baba (qq)					
	Temperatura ambiente			Humedad relativa		
	5	8	11	5	8	11
KATBALPOM	41.58 ± 5.79 ^{a(X)}	38.06 ± 4.75 ^{b(X)}	40.17 ± 4.33 ^{ab(X)}	0.50 ± 0.09 ^{a(Y)}	0.47 ± 0.13 ^{ab(Z)}	0.43 ± 0.11 ^{b(Y)}
ASOSELNOR	33.42 ± 3.86 ^{a(Y)}	34.75 ± 4.99 ^{a(Y)}	34.15 ± 3.94 ^{a(Y)}	0.70 ± 0.80 ^{a(X)}	0.60 ± 0.14 ^{b(Y)}	0.65 ± 0.11 ^{ab(X)}
ASODIRP	32.03 ± 4.11 ^{b(Y)}	34.92 ± 7.30 ^{a(Y)}	32.56 ± 3.92 ^{ab(Y)}	0.64 ± 0.12 ^{b(X)}	0.71 ± 0.13 ^{a(X)}	0.64 ± 0.11 ^{b(X)}

¹ Medias seguidas con igual letra **minúscula** en la **fila** no son significativamente diferentes ($P > 0.05$).
Medias seguidas con igual letra **mayúscula** en la **columna** no son significativamente diferentes ($P > 0.05$).

² Desviación estándar

Cuadro 3. Separación de medias¹ y DE² para la variable temperatura de fermentación según localidad y masa de fermentación.

Localidad	Masa de Cacao en baba (qq)		
	Temperatura de fermentación		
	5	8	11
KATBALPOM	46.75 ± 6.26 ^{a(X)}	44.46 ± 7.01 ^{b(X)}	44.59 ± 7.05 ^{b(X)}
ASOSELNOR	44.18 ± 7.25 ^{a(Y)}	42.20 ± 9.28 ^{b(Y)}	41.60 ± 9.12 ^{b(Y)}
ASODIRP	42.49 ± 5.34 ^{b(Y)}	44.40 ± 7.13 ^{a(X)}	42.80 ± 6.42 ^{ab(Y)}

¹ Medias seguidas con igual letra **minúscula** en la **fila** no son significativamente diferentes ($P > 0.05$).
Medias seguidas con igual letra **mayúscula** en la **columna** no son significativamente diferentes ($P > 0.05$).

² Desviación estándar

Cuadro 4. Separación de medias¹ y DE² para temperatura de fermentación para las interacciones localidad por día y masa por día de fermentación.

Día	Localidad			Masa de Cacao en baba (qq)		
	KATBALPOM	ASOSELNOR	ASODIRP	11	8	5
0	29.49 ± 2.08 ^{a(X)}	28.18 ± 2.63 ^{a(X)}	28.94 ± 2.88 ^{a(X)}	28.79 ± 1.91 ^{a(X)}	27.97 ± 2.93 ^{a(X)}	29.85 ± 2.52 ^{a(X)}
1	38.94 ± 4.15 ^{b(X)}	33.04 ± 5.61 ^{b(Y)}	37.62 ± 2.82 ^{b(X)}	34.47 ± 4.43 ^{b(Y)}	35.80 ± 5.27 ^{b(Y)}	39.33 ± 4.03 ^{b(X)}
2	45.99 ± 2.81 ^{c(X)}	37.91 ± 9.34 ^{c(Y)}	43.49 ± 3.27 ^{c(X)}	40.35 ± 7.21 ^{c(Y)}	41.83 ± 8.31 ^{c(Y)}	45.21 ± 2.94 ^{c(X)}
3	49.20 ± 1.844 ^{c(X)}	43.30 ± 5.37 ^{d(Y)}	45.99 ± 2.99 ^{c(Y)}	44.95 ± 5.26 ^{de(X)}	46.47 ± 4.06 ^{d(X)}	47.07 ± 3.68 ^{c(X)}
4	47.49 ± 1.53 ^{c(X)}	45.84 ± 4.88 ^{de(X)}	45.99 ± 1.63 ^{c(X)}	44.73 ± 3.97 ^{d(Y)}	47.93 ± 1.53 ^{d(X)}	46.65 ± 2.62 ^{c(X)}
5	48.85 ± 1.79 ^{c(X)}	49.29 ± 0.63 ^{e(X)}	47.46 ± 3.10 ^{c(X)}	48.27 ± 1.79 ^{de(X)}	48.85 ± 2.52 ^{d(X)}	48.29 ± 2.32 ^{c(X)}
6	48.93 ± 1.17 ^{c(X)}	48.66 ± 0.99 ^{e(X)}	46.13 ± 2.04 ^{c(Y)}	48.53 ± 1.49 ^{de(X)}	48.14 ± 1.65 ^{d(X)}	47.39 ± 2.58 ^{c(X)}
7	49.09 ± 1.63 ^{c(X)}	48.78 ± 0.77 ^{e(X)}	46.94 ± 2.04 ^{c(X)}	48.25 ± 0.99 ^{de(X)}	47.93 ± 1.78 ^{d(X)}	48.63 ± 2.45 ^{c(X)}
8	49.08 ± 2.54 ^{c(X)}	48.93 ± 1.17 ^{e(X)}	46.60 ± 2.23 ^{c(X)}	48.62 ± 1.06 ^{e(X)}	48.25 ± 2.05 ^{d(X)}	47.86 ± 3.36 ^{c(X)}

¹ Medias seguidas con igual letra **minúscula** en la **columna** no son significativamente diferentes ($P > 0.05$).
Medias seguidas con igual letra **mayúscula** en la **fila** no son significativamente diferentes ($P > 0.05$).

² Desviación estándar

y localidad de procesamiento. El análisis de separación de medias Tukey (Cuadro 3) mostró que la asociación KATBALPOM presentó mejores promedios de temperatura en comparación con las otras dos asociaciones, independientemente de la masa de fermentación. KATBALPOM presentó los promedios más altos de temperatura durante el procesamiento de 5 y 11 quintales de cacao; además también presentó el promedio más alto durante la fermentación de 8 quintales junto con ASODIRP.

El proceso de fermentación de cacao dentro de cada una de las tres localidades también presentó diferencias dependiendo de la masa. Es decir que, en las tres localidades el promedio de temperatura fue diferente dependiendo de la masa de procesamiento. Las asociaciones KATBALPOM y ABOSELNOR presentaron mejores promedios de temperatura durante la fermentación de 5 quintales en comparación con el procesamiento de los lotes más grandes evaluados en esta la misma localidad (8 y 11 quintales) (Cuadro 3). Esto indica que estas dos asociaciones obtuvieron mejores resultados durante el procesamiento de pequeñas masas de cacao. Por otro lado, en ASODIRP el promedio más alto de temperatura de fermentación se obtuvo durante el procesamiento de 8 quintales (Cuadro 3), lo que indica que esta asociación presentó mayores dificultades en el incremento de la temperatura en lotes pequeños y grades. En general, los tratamientos ABOSELNOR 11 y ABOSELNOR 8 fueron los que más dificultad presentaron en el incremento de la temperatura de fermentación, principalmente durante los primeros cuatro días.

Con base en el análisis de varianza se observó que la interacción entre los factores localidad y día de fermentación fue significativa, lo cual indica que el perfil de temperatura fue diferente durante algunos días de procesamiento en las diferentes localidades. La separación de medias Tukey mostró que los perfiles de temperatura fueron similares para las asociaciones KATBALPOM y ASODIRP, ya que únicamente presentaron diferencias significativas durante dos días de procesamiento (día 3 y 6) (Cuadro 4). Esta diferencia en los dos días de fermentación puede ser debido a diferencias en las frecuencias de volteos de la masa de cacao durante el proceso. En estas dos asociaciones se realizó el primer volteo a las 48 horas. Sin embargo; en KATBALPOM se continuaron los volteos cada 24 horas en los siguientes días y en ASODIRP se reportaron hasta tres volteos cada 48 horas para algunos lotes, lo cual pudo influenciar en el perfil de temperatura. ABOSELNOR presentó mayor variabilidad y diferente tendencia en el incremento de temperatura durante los primeros tres días de fermentación, en comparación con las otras dos asociaciones; sin embargo, durante los últimos cuatro días la temperatura más fue estable y con un comportamiento similar al de las otras dos localidades (Cuadro 4). La temperatura de procesamiento durante los dos últimos días de fermentación fue similar para las tres asociaciones, lo cual indica que a pesar de que ABOSELNOR presentó mayor variabilidad y diferente tendencia en el incremento de la

temperatura al inicio del proceso, esto no influyó en los valores de temperatura al finalizar la fermentación (Cuadro 4).

Existió significancia estadística en la interacción de los factores masa y día de procesamiento, esto indica que el perfil de temperatura de fermentación en algunos días fue diferente según la masa de proceso. La mayor diferencia en los perfiles de temperatura por día de fermentación se observó en los primeros cuatro días (Cuadro 4), periodo en el que la fermentación de 5 quintales presentó los promedios de temperatura más altos. Si embargo; desde el quinto al octavo día, no se observaron diferencias significativas entre la temperatura promedio de las diferentes masas de fermentación. Estos resultados son similares a los reportados por Hernández-Hernández et al. (2016), quienes observaron mayor variabilidad en la temperatura de fermentación durante los primeros tres días de procesamiento de tres diferentes masas de fermentación (22, 7 y 2 quintales), seguido por un comportamiento similar hasta finalizar el procesamiento.

• pH de la testa

El promedio de pH de la testa para la ecorregión fue de 4.33. En el análisis de los factores de masa y localidad, mediante el análisis de medias Tukey (Cuadro 5) se observó que en la asociación KATBALPOM, el promedio de pH de la testa más alto se obtuvo durante el procesamiento de 5 quintales, con un valor de 4.61, el cual tuvo diferencias significativas con relación al valor de pH de la testa durante el procesamiento de 8 y 11 quintales. Las otras dos asociaciones, ABOSELNOR y ASODIRP, no presentaron diferencias estadísticas significativas en el valor promedio de pH de la testa durante el procesamiento de 5, 8 y 11 quintales (Cuadro 5).

Al analizar el procesamiento de cacao de 5 quintales en las diferentes localidades se observó que existió diferencia entre las tres asociaciones, KATBALPOM (4.61) fue la asociación con el promedio de pH de la testa más alto, seguido de ASODIRP (4.39) y ABOSELNOR (4.24). El promedio de pH de la testa para el procesamiento de 8 quintales no tuvo diferencia estadística significativa entre KATBALPOM y ASODIRP. El promedio más bajo durante el procesamiento de 8 quintales se presentó en ABOSELNOR (4.22). En el procesamiento de 11 quintales de cacao, únicamente se observaron diferencias significativas entre ABOSELNOR y ASODIRP (Cuadro 5).

El análisis de la interacción de los factores localidad y día mediante la separación de medias Tukey mostró que el promedio de pH de la testa más alto se reportó al octavo día en KATBALPOM (4.81). En ASODIRP se obtuvieron incrementos significativos durante los primeros cuatro días; sin embargo, del cuarto al octavo día de fermentación no existieron diferencias estadísticas significativas en los valores de pH de la testa (Cuadro 6). En el inicio del procesamiento, día cero, se observaron diferencias significativas en el pH de la testa ($p \leq 0.05$), en el cual ABOSELNOR presentó el valor

Cuadro 5. Separación de medias¹ y DE² para pH de la testa y pH del cotiledón según localidad y masa de fermentación.

Localidad	Masa de Cacao en baba (qq)					
	pH de la testa			pH del cotiledón		
	5	8	11	5	8	11
KATBALPOM	4.61 ± 0.41 ^{a(X)}	4.38 ± 0.35 ^{b(X)}	4.26 ± 0.29 ^{b(XY)}	5.02 ± 0.49 ^{a(X)}	4.83 ± 0.53 ^{b(Y)}	4.75 ± 0.56 ^{b(Z)}
ASOSELNOR	4.24 ± 0.30 ^{a(Z)}	4.22 ± 0.32 ^{a(Y)}	4.19 ± 0.33 ^{a(Y)}	4.79 ± 0.64 ^{b(Y)}	5.09 ± 0.76 ^{a(X)}	4.91 ± 0.68 ^{b(Y)}
ASODIRP	4.39 ± 0.30 ^{a(Y)}	4.36 ± 0.34 ^{a(X)}	4.36 ± 0.31 ^{a(X)}	5.12 ± 0.72 ^{a(X)}	5.09 ± 0.76 ^{a(X)}	5.21 ± 0.78 ^{a(X)}

¹ Medias seguidas con igual letra **minúscula** en la **fila** no son significativamente diferentes ($P > 0.05$).
Medias seguidas con igual letra **mayúscula** en la **columna** no son significativamente diferentes ($P > 0.05$).

² Desviación estándar

Cuadro 6. Separación de medias¹ y DE² para pH de la testa para las interacciones localidad por día y masa por día de fermentación.

Día	Localidad			Masa de Cacao en baba (qq)		
	KATBALPOM	ASOSELNOR	ASODIRP	11	8	5
0	3.82 ± 0.25 ^{f(Y)}	4.17 ± 0.30 ^{bcd(X)}	3.88 ± 0.20 ^{c(Y)}	3.92 ± 0.35 ^{e(X)}	3.89 ± 0.23 ^{e(X)}	4.06 ± 0.28 ^{d(X)}
1	4.10 ± 0.16 ^{e(X)}	4.12 ± 0.15 ^{cd(X)}	3.92 ± 0.23 ^{c(X)}	4.02 ± 0.19 ^{de(XY)}	3.96 ± 0.20 ^{de(Y)}	4.17 ± 0.16 ^{d(X)}
2	4.37 ± 0.18 ^{d(X)}	4.08 ± 0.18 ^{a(Y)}	4.23 ± 0.12 ^{b(XY)}	4.21 ± 0.18 ^{cd(X)}	4.21 ± 0.14 ^{cd(X)}	4.25 ± 0.27 ^{cd(X)}
3	4.29 ± 0.17 ^{de(XY)}	4.14 ± 0.22 ^{cd(Y)}	4.38 ± 0.13 ^{ab(X)}	4.17 ± 0.18 ^{de(X)}	4.33 ± 0.17 ^{bc(X)}	4.31 ± 0.22 ^{cd(X)}
4	4.46 ± 0.34 ^{cd(X)}	4.06 ± 0.36 ^{d(Y)}	4.56 ± 0.20 ^{a(X)}	4.26 ± 0.35 ^{bcd(Y)}	4.31 ± 0.39 ^{bc(XY)}	4.50 ± 0.35 ^{abc(X)}
5	4.52 ± 0.20 ^{bcd(X)}	4.08 ± 0.41 ^{d(Y)}	4.50 ± 0.15 ^{a(X)}	4.28 ± 0.33 ^{bcd(X)}	4.31 ± 0.39 ^{bc(XY)}	4.44 ± 0.32 ^{bc(X)}
6	4.65 ± 0.24 ^{abc(X)}	4.42 ± 0.28 ^{ab(Y)}	4.58 ± 0.10 ^{a(XY)}	4.44 ± 0.14 ^{abc(X)}	4.61 ± 0.16 ^{a(X)}	4.60 ± 0.34 ^{ab(X)}
7	4.78 ± 0.28 ^{ab(X)}	4.38 ± 0.21 ^{abc(Y)}	4.65 ± 0.14 ^{a(X)}	4.50 ± 0.14 ^{ab(Y)}	4.58 ± 0.14 ^{ab(XY)}	4.74 ± 0.40 ^{a(X)}
8	4.81 ± 0.24 ^{a(X)}	4.51 ± 0.30 ^{a(Y)}	4.58 ± 0.10 ^{a(Y)}	4.63 ± 0.17 ^{a(X)}	4.60 ± 0.18 ^{a(X)}	4.67 ± 0.38 ^{ab(X)}

¹ Medias seguidas con igual letra **minúscula** en la **columna** no son significativamente diferentes ($P > 0.05$).
Medias seguidas con igual letra **mayúscula** en la **fila** no son significativamente diferentes ($P > 0.05$).

² Desviación estándar

más alto (4.17) en comparación con las otras dos asociaciones (Cuadro 6). Esta diferencia puede ser debido a la variación en el estado de madurez de los frutos cosechados, lo cual se refleja en el leve incremento del pH de la testa. Los ácidos orgánicos, principalmente ácido cítrico, decrecen en concentración al incrementar el estado de madurez del fruto y por lo tanto el pH incrementa levemente conforme avanza el proceso de maduración (Nielsen, 2017). ASOSELNOR también presentó los valores más bajos de pH de la testa desde el segundo día de fermentación hasta el final del proceso. Esta asociación presentó un comportamiento diferente en los cambios de pH de la testa en comparación con las otras dos localidades.

El análisis de la interacción de factores masa y día de fermentación mostró mediante prueba de separación de medias Tukey que, durante el procesamiento de 11 quintales el promedio más alto de pH se obtuvo durante el último día de procesamiento con 4.63 y en la fermentación de 8 quintales el máximo valor se alcanzó al sexto día con 4.61. Por otro lado, durante el procesamiento de 5 quintales, el valor más alto se obtuvo al séptimo día de procesamiento, con 4.74, seguido de una leve disminución durante el último día de fermentación (Cuadro 6).

En el inicio del proceso de fermentación, día cero, las tres masas de fermentación no presentaron diferencias en el valor

del pH de la testa. Resultado diferente al observado en el análisis de la interacción de factores de localidad y día de fermentación, en donde una de las asociaciones presentó valores iniciales más altos. En general, el comportamiento del pH de la testa fue similar durante el procesamiento de las tres masas de fermentación, observando diferencia en los valores de pH de la testa únicamente en cuatro días (día 1, 4, 5 y 7) durante el procesamiento, principalmente debido a bajos valores de pH observados durante la fermentación de 11 quintales de cacao. El pH de la testa fue incrementando durante cada día de procesamiento, lo cual refleja los cambios generados por los microorganismos durante la fermentación. Al finalizar el proceso, las tres masas de fermentación (11, 8 y 5 quintales) no presentaron diferencia en el valor final de pH de la testa de los granos de cacao.

• pH del cotiledón

Mediante la separación de medias Tukey se determinó que, en la fermentación de 5 quintales de cacao, KATBALPOM y ASODIRP no presentaron diferencias en el promedio de pH del cotiledón. Por otro lado, ASOSELNOR fue estadísticamente diferente a las otras dos asociaciones, presentando el promedio más bajo con 4.79 (Cuadro 5). En la fermentación de 8 quintales de cacao, ASOSELNOR y ASODIRP no presentaron diferencias, y KATBALPOM presentó el promedio de pH del cotiledón más bajo con 4.83 (Cuadro 5). En el procesamiento de 11 quintales existió diferencia entre las tres asociaciones, el valor más alto se observó en ASODIRP (5.21), seguido de ASOSELNOR (4.91), y KATBALPOM (4.75). En general, los promedios más altos se observaron en ASODIRP en las tres masas de fermentación.

Los resultados mostraron diferencias en el pH del cotiledón durante el procesamiento de diferentes masas de cacao en cada comunidad, es decir que existe variabilidad dentro de las comunidades cuando se procesan diferentes masas de cacao, principalmente en KATBALPOM y ASOSELNOR. Los resultados mostraron que en KATBALPOM el procesamiento de 5 quintales presentó un promedio de pH del cotiledón más alto en comparación con el procesamiento de 8 y 11 quintales en esta misma asociación. En ASOSELNOR, fue el procesamiento de 8 quintales de cacao que presentó el promedio de pH más alto en comparación con las otras dos masas de fermentación. Por otro lado, en ASODIRP no existió diferencia en el pH del cotiledón durante el procesamiento de las tres masas (Cuadro 5).

La separación de medias Tukey permitió determinar que, en la interacción de los factores de localidad y día de fermentación, KATBALPOM en el día cero y uno presentó valores de pH del cotiledón diferentes a los otros días de procesamiento. Desde el segundo hasta el octavo día de fermentación no existió diferencia en el pH del cotiledón, sin embargo, si se observó tendencia decreciente del pH durante los primeros tres días, seguido de un periodo de ligero incremento del pH durante los últimos cuatro días de

fermentación (Cuadro 7). En ASOSELNOR el pH disminuyó significativamente durante los primeros tres días de proceso, a partir del cuarto día no existieron diferencias en el cambio de pH del cotiledón ($p > 0.05$). Similar comportamiento fue obtenido en ASODIRP, donde en el segundo y tercer día de procesamiento se obtuvo una reducción significativa de pH y entre el quinto y octavo día no existió cambio significativo en la acidez del cotiledón (Cuadro 7).

En el inicio de la fermentación, ASODIRP presentó el valor más alto en pH del cotiledón con 6.50. En los primeros tres días KATBALPOM presentó pH promedio menor al de las otras dos asociaciones, lo que indica que los ácidos generados durante los primeros días de procesamiento ingresaron al cotiledón con mayor rapidez en esta localidad. Desde el cuarto hasta el séptimo día no existió diferencia entre el procesamiento de cacao en las tres asociaciones ($p > 0.05$). Al finalizar el proceso de fermentación KATBALPOM presentó el promedio de pH del cotiledón más alto con 4.72 y ASOSELNOR reportó el promedio más bajo con 4.44 (Cuadro 7).

Mediante la separación de medias Tukey para la interacción de factores entre masa y día de fermentación (Cuadro 7) se observó que en el procesamiento de 11 quintales de cacao se presentaron cambios significativos en el pH durante los primeros tres días de procesamiento; del quinto al octavo día de fermentación no hubo cambios significativos en el pH del cotiledón. Durante la fermentación de 8 quintales solamente se observaron cambios significativos entre el primero, segundo, y tercer día de procesamiento, del tercer al octavo día no hubo cambios significativos en la acidez del cotiledón. En la fermentación de 5 quintales también se observaron cambios significativos durante los primeros tres días de proceso; sin embargo, en este caso el pH más bajo ($p \leq 0.05$) se obtuvo al llegar al quinto día de fermentación, con un valor de 4.54, luego el pH del cotiledón incrementó levemente, finalizando con un valor de 4.66 (Cuadro 7).

En general, el comportamiento del pH del cotiledón fue similar en las tres masas de fermentación evaluadas, las principales diferencias se observaron en los primeros dos días de procesamiento debido a la rápida disminución de la acidez en la fermentación de 5 quintales. En el día cero de procesamiento no existió diferencia en el pH inicial del cotiledón de los granos de cacao, sin embargo, en el primer y segundo día de proceso, la fermentación de 5 quintales de cacao presentó valores más bajos en el pH interno de los granos de cacao. Desde el tercer al octavo día de fermentación, no se presentaron diferencias en pH del cotiledón en las tres masas de procesamiento (Cuadro 7).

• Determinación de la finalización del proceso de fermentación

La testa actúa como una barrera semipermeable para la circulación de sustancias entre los cotiledones y el mucílago (Figura 1). Previa investigación han demostrado que la

Cuadro 7. Separación de medias¹ y DE² para la variable pH del cotiledón para las interacciones localidad por día y masa por día de fermentación.

Día	Localidad			Masa de Cacao en baba (qq)		
	KATBALPOM	ASOSELNOR	ASODIRP	11	8	5
0	5.99 ± 0.40 ^{a(Y)}	6.01 ± 0.36 ^{a(Y)}	6.50 ± 0.10 ^{a(X)}	6.12 ± 0.46 ^{a(X)}	6.12 ± 0.42 ^{a(X)}	6.26 ± 0.28 ^{a(X)}
1	5.33 ± 0.37 ^{b(Z)}	5.74 ± 0.42 ^{ab(Y)}	6.22 ± 0.28 ^{a(X)}	5.76 ± 0.55 ^{b(X)}	5.90 ± 0.56 ^{a(X)}	5.64 ± 0.41 ^{b(Y)}
2	4.78 ± 0.38 ^{c(Y)}	5.46 ± 0.70 ^{b(X)}	5.47 ± 0.43 ^{b(X)}	5.33 ± 0.65 ^{c(X)}	5.46 ± 0.61 ^{b(X)}	4.93 ± 0.46 ^{c(Y)}
3	4.53 ± 0.14 ^{c(Y)}	4.93 ± 0.36 ^{c(X)}	4.98 ± 0.36 ^{c(X)}	4.91 ± 0.47 ^{d(X)}	4.75 ± 0.32 ^{c(X)}	4.78 ± 0.25 ^{cd(X)}
4	4.58 ± 0.24 ^{c(X)}	4.57 ± 0.19 ^{d(X)}	4.82 ± 0.18 ^{cd(X)}	4.65 ± 0.30 ^{de(X)}	4.59 ± 0.18 ^{c(X)}	4.73 ± 0.21 ^{cd(X)}
5	4.56 ± 0.16 ^{c(X)}	4.38 ± 0.20 ^{d(X)}	4.58 ± 0.14 ^{d(X)}	4.50 ± 0.16 ^{e(X)}	4.50 ± 0.12 ^{c(X)}	4.54 ± 0.27 ^{d(X)}
6	4.65 ± 0.23 ^{c(X)}	4.43 ± 0.18 ^{d(X)}	4.56 ± 0.10 ^{d(X)}	4.46 ± 0.16 ^{e(X)}	4.55 ± 0.18 ^{c(X)}	4.63 ± 0.22 ^{cd(X)}
7	4.68 ± 0.24 ^{c(X)}	4.42 ± 0.21 ^{d(X)}	4.59 ± 0.11 ^{d(X)}	4.47 ± 0.09 ^{e(X)}	4.57 ± 0.14 ^{c(X)}	4.65 ± 0.33 ^{cd(X)}
8	4.72 ± 0.28 ^{c(X)}	4.44 ± 0.24 ^{d(Y)}	4.57 ± 0.14 ^{d(X)}	4.44 ± 0.10 ^{e(X)}	4.60 ± 0.16 ^{c(X)}	4.66 ± 0.37 ^{cd(X)}

¹ Medias seguidas con igual letra **minúscula** en la **columna** no son significativamente diferentes ($P > 0.05$).
Medias seguidas con igual letra **mayúscula** en la **fila** no son significativamente diferentes ($P > 0.05$).

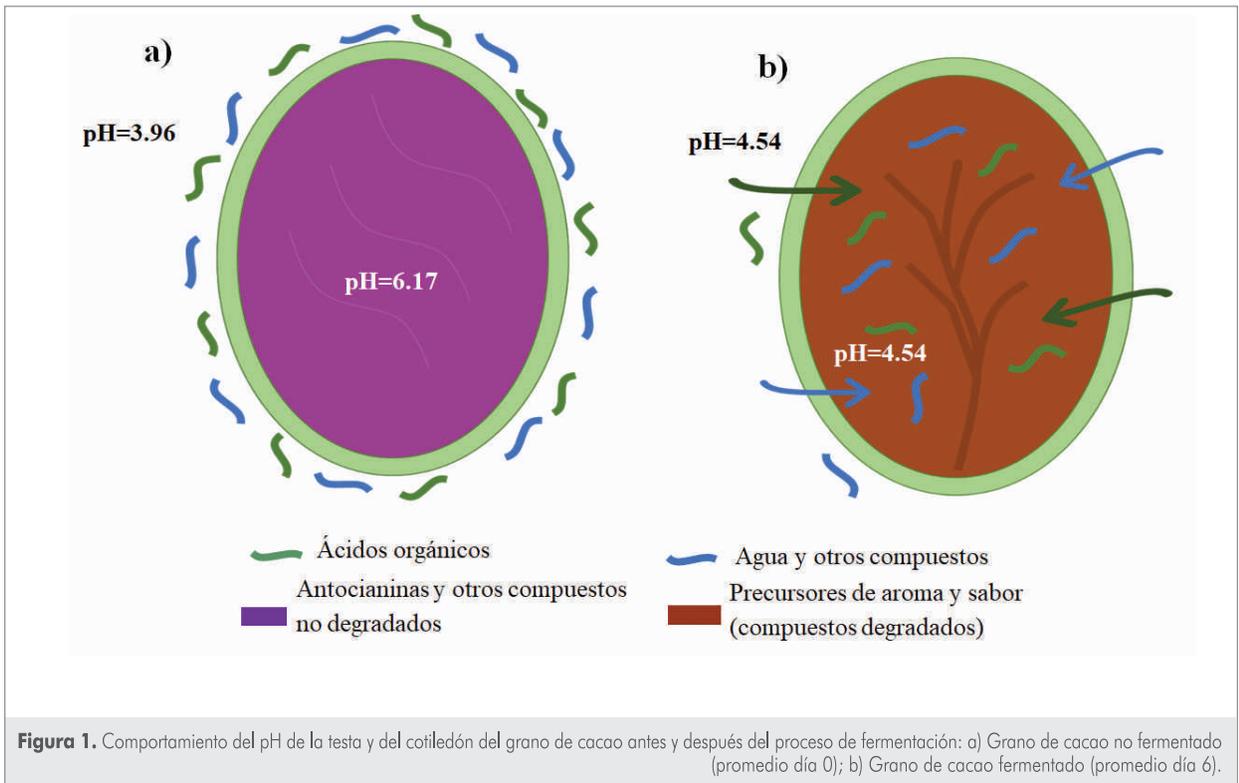
² Desviación estándar

testa es permeable al agua, etanol, ácido acético y láctico y algunos componentes orgánicos volátiles (Afoakwa, 2014; Wood, 2001). La testa también actúa como barrera para contener las sustancias (precursores de sabor) que son liberadas y formadas en los cotiledones (parte interna del grano) durante la fermentación. Además, la testa posee un rol importante en la tasa de transferencia de masas o sustancias durante el secado (Wood, 2001).

Por esta razón, el monitoreo de pH de la testa y pH del cotiledón es importante debido a que es un indicador del grado de cambios que han ocurrido en el mucílago y en la parte interna del grano de cacao. Andersson et al. (2006) sugiere que la calidad de aroma y sabor de los granos de cacao fermentados se debe principalmente a las características de transporte cinético de agua y solutos a través de la testa de los granos durante el proceso de fermentación. El mucílago de la fruta y la testa de los granos son exclusivamente de origen materno, mientras que el embrión y el endospermo están conformados por el código genético de los dos padres, lo que significa que la genética del árbol que actúa como madre influencia en mayor proporción el desarrollo de aroma y sabor en los granos de cacao (Andersson et al., 2006). El punto en el cual el pH de la testa y pH del cotiledón coinciden es considerado como el punto óptimo para la finalización del proceso de fermentación (Figuras 1b y 2), ya que en este momento los ácidos generados en el exterior han ingresado completamente a la parte interna del grano, generando las mismas condiciones de acidez dentro y fuera del grano de cacao.

El comportamiento del pH de la testa, la cual está en contacto directo con el mucílago, depende del estado de madurez del fruto y de la actividad de los microorganismos durante la fermentación. El estado de madurez de los granos de cacao al momento de cosecha determina la concentración de ácido cítrico y la cantidad de azúcares presentes en el mucílago, y estos a su vez serán el sustrato para el crecimiento y metabolismo de los microorganismos. Por esta razón, los criterios de cosecha empleados en las diferentes localidades determinan el estado y la calidad del sustrato que utilizarán los microorganismos durante el procesamiento. Por otro lado, el valor del pH del cotiledón es similar al inicio del procesamiento y los cambios durante la fermentación dependen del grado de difusión de los compuestos generados en la pulpa hacia lo interno de los granos de cacao a través de la testa.

Los resultados mostraron que los valores óptimos del pH de la testa y del cotiledón para la finalización del proceso de fermentación fueron ligeramente diferentes dependiendo de la localidad y de la masa de procesamiento (Figura 2). Algunos tratamientos alcanzaron valores óptimos al quinto día de fermentación (KATBALPOM con 5 y 8 quintales), y otros al séptimo día de procesamiento (ASOSELNOR con 5 quintales). Esto indica que los valores óptimos de pH de la testa y del cotiledón para la finalización de la fermentación deben ser determinados para cada localidad y masa de procesamiento, ya que no existe un valor único recomendado debido a la variabilidad en el comportamiento de los valores de pH dependiendo de las condiciones de procesamiento.



Cuadro 8. Correlación de Pearson (amarillo) y valor de p^1 (Verde) de las principales variables de fermentación de cacao.

	Humedad Ambiente	Temperatura Ambiente	Temperatura de Fermentación	pH de la testa	pH del cotiledón
Humedad ambiente	1	-0.573	-0.101	-0.097	0.114
		0.000	0.071	0.081	0.040
Temperatura ambiente	-0.573	1	0.273	0.299	-0.187
	0.000		0.000	0.000	0.001
Temperatura de fermentación	-0.101	0.273	1	0.547	-0.826
	0.071	0.000		0.000	0.000
pH de la testa	-0.097	0.299	0.547	1	-0.406
	0.081	0.000	0.000		0.000
pH del cotiledón	0.114	-0.187	-0.826	-0.406	1
	0.040	0.001	0.000	0.000	

¹ Valores con una probabilidad < 0.05 se consideran significativos

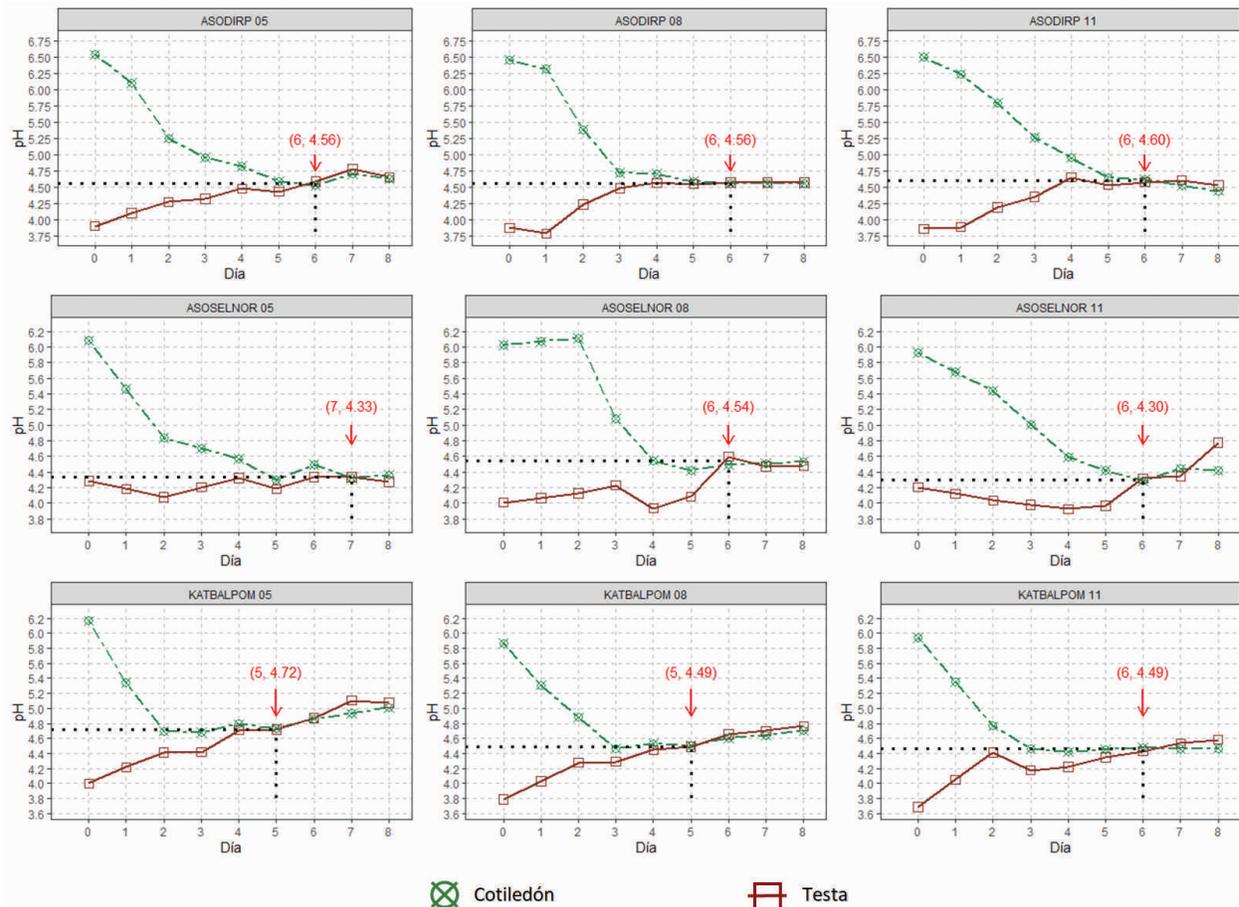


Figura 2. Perfil de pH para cada tratamiento (localidad y masa) durante la fermentación de cacao.

• Correlación de las principales variables de fermentación

La dinámica de la temperatura de fermentación y el pH de la testa y del cotiledón en función del tiempo se presentan en las Figuras 3 y 5. Tanto el pH de la testa como la temperatura de fermentación se incrementan a medida que avanza el proceso de fermentación. En el caso del pH del cotiledón, este se reduce con el incremento de la temperatura de fermentación.

El análisis de correlación de Pearson (Cuadro 8) mostró que existe una moderada correlación lineal positiva (0.547) entre la temperatura de fermentación y pH de la testa del cacao, lo cual indica que, al incrementar la temperatura de fermentación, existe un incremento del pH de la testa. Por otro lado, existe una alta correlación lineal negativa (-0.826) entre la temperatura de fermentación y el pH del cotiledón, indicando que cuando incrementa la temperatura de fermentación, el pH del cotiledón disminuye.

Este comportamiento se observó durante el procesamiento de cacao, donde las asociaciones que presentaron mayor promedio de temperatura de fermentación también presentaron mayor promedio de pH de la testa y menores valores de pH del cotiledón. La relación entre los cambios de temperatura de la masa, el incremento del pH de la testa y la disminución del pH del cotiledón se debe a la acción de los microorganismos sobre el mucílago del cacao en fermentación (Afoakwa, 2016a). El mucílago está compuesto por agua (82-87%), azúcares (10-13%), sales (8-10%), pentosanos (2-3%), y ácido cítrico (1-2%), y es el sustrato utilizado por los microorganismos para la fermentación. Los componentes producidos por las levaduras y las bacterias generan cambios de pH y migran a través de la testa hacia la parte interna de los granos de cacao, provocando una reducción en el pH del cotiledón. La temperatura de fermentación puede ser utilizada como un indicador para la predicción de los valores de pH de la testa y del cotiledón debido a la alta correlación de las variables.

Análisis de regresión de las principales variables de fermentación

La temperatura de fermentación presentó alta correlación con los valores de pH de la testa y del cotiledón durante el procesamiento de cacao. Por esta razón, se realizó un análisis de regresión lineal y no lineal, para determinar el mejor modelo para la predicción de los perfiles de pH utilizando la temperatura de la masa de fermentación como variable independiente. Los modelos generados en el presente estudio describen la relación existente entre las variables de fermentación bajo las condiciones de procesamiento evaluadas en esta investigación y pueden ser utilizados como una guía para el estudio y monitoreo del proceso de fermentación. Sin embargo; es recomendable que los productores de cacao generen modelos y perfiles de fermentación bajo las condiciones de procesamiento existentes en cada una de las regiones de producción para obtener modelos más ajustados y con mejores niveles de predicción.

Regresión no lineal entre temperatura de fermentación y pH de la testa

Se realizó una regresión no lineal para determinar el mejor modelo para explicar el efecto de los cambios de temperatura en el valor del pH de la testa de cacao durante la fermentación. A través del modelo seleccionado (Figura 4) se realizó una predicción de los valores de pH de la testa utilizando la temperatura de la masa de fermentación como referencia.

El uso de este modelo ajustado permite obtener un valor aproximado de los valores de pH de forma inmediata, ya que la medición de temperatura no requiere de equipo especial ni de preparación de la muestra para la medición. Sin embargo, por ser un modelo de predicción posee un nivel de error, el cual se expresa a través del intervalo de confianza.

Regresión lineal entre temperatura de fermentación y pH del cotiledón

Se realizó la estimación de la pendiente y el intercepto del modelo lineal entre la temperatura de la masa en fermentación y pH del cotiledón para el establecimiento del modelo de regresión lineal entre ambas variables (Figura 6). En el caso del presente estudio, de acuerdo con el perfil promedio de pH de la testa y del cotiledón para la ecorregión de Lachuá, el final del proceso se obtuvo al sexto día de fermentación, con un valor final de pH de 4.5 (testa y cotiledón) y una temperatura de 48.02°C. Según el modelo de predicción, con este valor de temperatura el valor de pH del cotiledón al final del proceso está entre 4.13 y 5.18, de acuerdo con el intervalo de confianza del modelo. Con este modelo es posible establecer un estimado de los valores de pH del cotiledón mediante el uso de la temperatura como variable de predicción, esto permite obtener una idea de los cambios que han ocurrido en la parte interna de los granos de cacao de forma rápida. Sin embargo; los modelos deben ser validados y ajustados a las condiciones locales de procesamiento de cada localidad debido a que diversos factores influyen en los perfiles de fermentación.

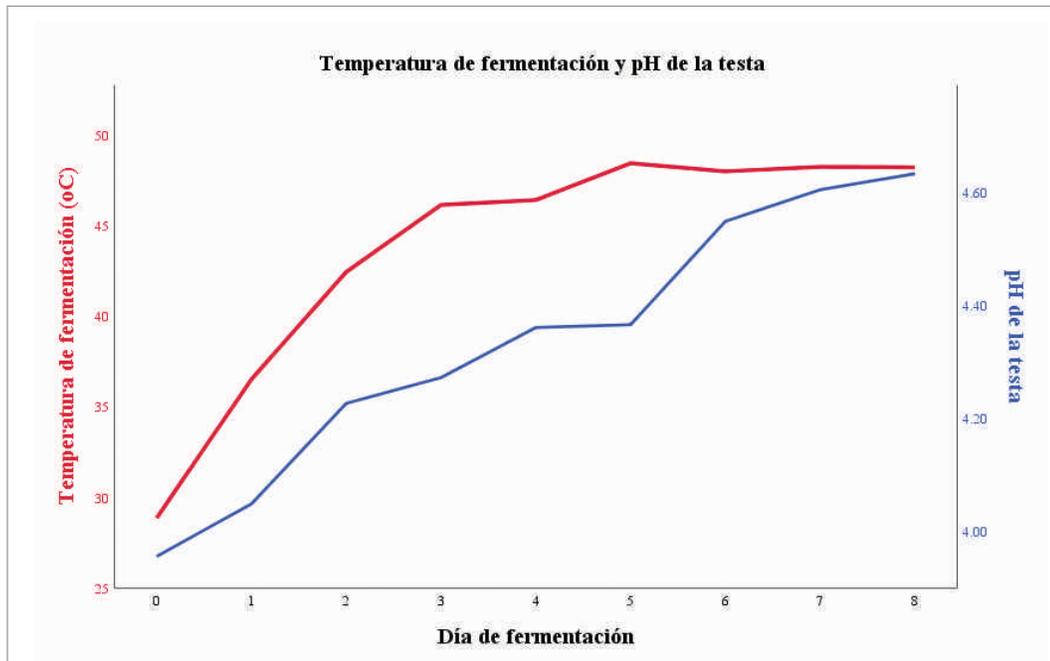


Figura 3. Dinámica de la temperatura de fermentación y pH de la testa en función del tiempo de fermentación.

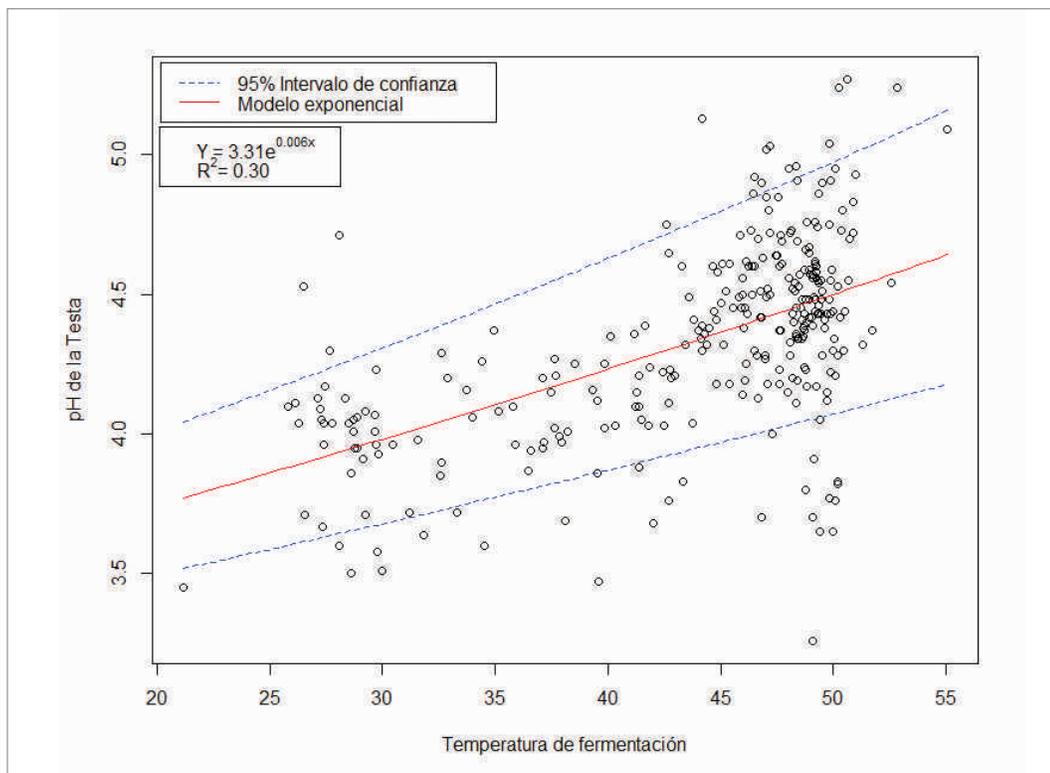


Figura 4. Relación entre temperatura de fermentación y pH de la testa.

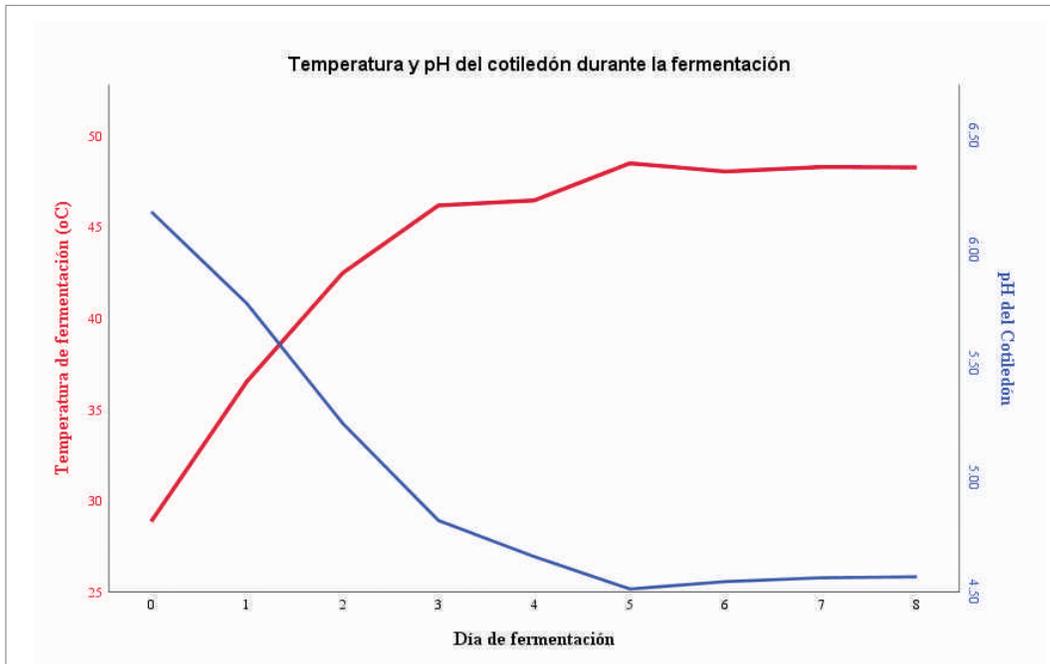


Figura 5. Dinámica de la temperatura de fermentación y pH del cotiledón en función del tiempo de fermentación.

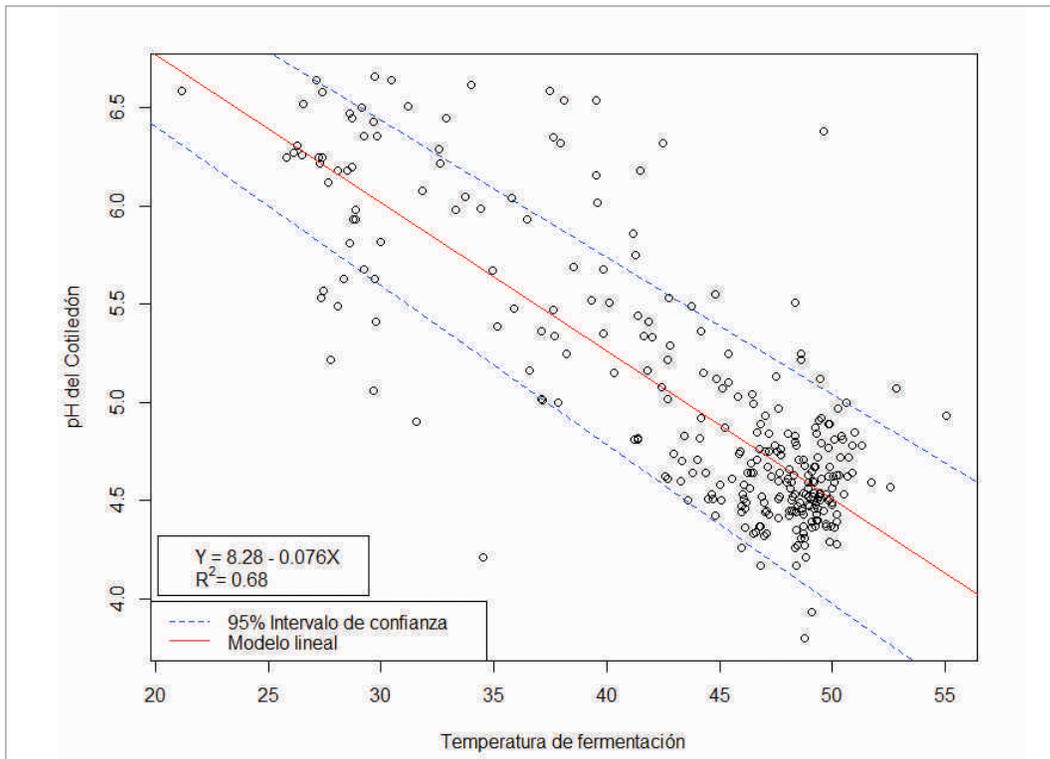


Figura 6. Relación entre la temperatura de fermentación y el pH del cotiledón.

CONCLUSIONES

- Para la región de Lachuá, el proceso de fermentación finaliza al sexto día de procesamiento cuando la temperatura alcanza un valor de 48.02°C y el pH de la testa y del cotiledón coinciden con un valor de pH de 4.50. Sin embargo; los resultados mostraron que los perfiles de fermentación dependen de la localidad y masa de procesamiento. Para los tratamientos KATBALPOM 5 quintales y KATBALPOM 8 quintales, el final de la fermentación se obtuvo al quinto día de procesamiento con un valor de pH de 4.72 y 4.49 respectivamente. Por el contrario, el tratamiento que requirió mayor tiempo para la finalización fue ASOSELNOR 5 quintales, el cual finalizó el proceso de fermentación al séptimo día de procesamiento con un valor final de pH de 4.33. Además, se pudo observar que existe una correlación lineal positiva (0.547) entre la variable temperatura de fermentación y pH de la testa y una alta correlación lineal negativa (-0.826) entre la temperatura de fermentación y el pH del cotiledón. Por lo tanto, la temperatura de la masa de fermentación podría ser utilizada como un indicador para la estimación de los valores de pH.
- Estos resultados sugieren que los protocolos utilizados actualmente en la ecorregión de Lachuá pueden ser mejorados y ajustados de acuerdo con la masa de cacao en fermentación y la localidad de procesamiento, basados en los perfiles de temperatura, pH de la testa y del cotiledón. Actualmente, la fermentación se realiza de forma empírica, únicamente realizando pruebas de corte, lo cual produce alta variabilidad en la calidad de la fermentación ya que el proceso finaliza de acuerdo con el criterio de las personas encargadas y no de mediciones de indicadores objetivos, como el pH y la temperatura. Además, los resultados sugieren que es posible utilizar la temperatura de la masa de fermentación como un indicador para el monitoreo de los perfiles de pH durante la fermentación de cacao.

AGRADECIMIENTOS

El presente proyecto de investigación fue posible gracias a la colaboración de los actores del Grupo de Trabajo Norte de la Cadena de Valor de Cacao de Guatemala; a la Fundación Laguna Lachuá (FUNDALACHUA) y sus asociaciones de base (ASODIRP, ASOSELNOR y KATBALOM); al Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA)

por el financiamiento del proyecto a través del programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria (CRIA) del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) en Guatemala; y al Centro Universitario del Norte CUNOR-USAC a través del Departamento de Estudios de Postgrado.

BIBLIOGRAFÍA

- Afoakwa, E. O. (2014). *Cocoa production and processing technology* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16546>
- Afoakwa, E. O. (2016a). The chemistry of flavour development during cocoa processing and chocolate manufacture. In *Chocolate science and technology* (2nd ed., pp. 154-170). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118913758.ch8>
- Afoakwa, E. O. (2016b). Cocoa bean composition and chocolate flavour development. In *Chocolate science and technology* (2da ed., pp. 80-101). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118913758.ch5>
- Agrocadena de Cacao de Guatemala. (2016). *Plan estratégico de la agrocadena de cacao de Guatemala*. <https://www.maga.gob.gt/download/enac16-25.pdf>
- Ali, N. A., Baccus-Taylor, G. S. H., Sukha, D. A., y Umaharan, P. (2016). *Exploring genetic diversity and postharvest processing management towards genetic branding*. Cocoa Research Centre.
- Amoa-Awua, W. K. (2015). Methods of cocoa fermentation and drying. In R. F. Schwan & G. H. Fleet (Eds.), *Fermented Foods and Beverages Series: Cocoa and coffee fermentations* (pp. 71-102). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17536>
- Andersson, M., Koch, G., y Lieberei, R. (2006). Structure and function of the seed coat of *Theobroma cacao* L. and its possible impact on flavour precursor development during fermentation. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 80(1), 48-62. <https://ojs.openagrar.de/index.php/JABFQ/index>
- García González, E., Serna Murillo, A. M., Córdoba Pantoja, D. A., Marín Aricapa, J. G., Montalvo Rodríguez, C., y Ordoñez Narváez, G. A. (2019). Estudio de la fermentación espontánea de cacao (*Theobroma cacao* L.) y evaluación de la calidad de los granos en una unidad productiva a pequeña escala. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 6(1), 41-51. <https://doi.org/10.23850/24220582.1635>
- Hernández Hernández, C., López Andrade, P. A., Ramírez Guillermo, M. A., Guerra Ramírez, D., y Caballero Pérez, J. F. (2016). Evaluation of different fermentation processes for use by small cocoa growers in Mexico. *Food Science & Nutrition*, 4(5), 690-695. <https://doi.org/10.1002/fsn3.333>
- Medina Müller, E. M. (2012). *Impacto del programa de incentivos forestales en la Ecorregión Lachuá, Guatemala* Centro Agronómico Tropical]. Turrialba, Costa Rica. <http://www.sidalc.net/repdoc/A8967e/A8967e.pdf>
- Nielsen, S. S. (2017). *Food analysis* (5ta ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45776-5>
- Ochoa, W. (2015). *Línea base de cadena del cultivo de cacao*. Proyecto "Fortalecimiento de la productividad de la micro, pequeña y mediana empresa". Ministerio de Economía. Gobierno de Guatemala. 85 p.
- Papalexandratou, Z., Vrancken, G., De Bruyne, K., Vandamme, P., y De Vuyst, L. (2011). Spontaneous organic cocoa bean box fermentations in Brazil are characterized by a restricted species diversity of lactic acid bacteria and acetic acid bacteria. *Food Microbiology*, 28(7), 1326-1338. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2011.06.003>
- Ruiz, A. (2015) *Mejoramiento de la transformación primaria del cacao*. (Contrato 083-2015-BRIFF 8000-GT). Proyecto "Fortalecimiento de la productividad de la micro, pequeña y mediana empresa". Ministerio de Economía. Gobierno de Guatemala. 93 p.
- Salguero, B. (2015). Análisis de la situación actual y diagnóstico de la cadena de valor de cacao. Proyecto "Fortalecimiento de la productividad de la micro, pequeña y mediana empresa". Ministerio de Economía. Gobierno de Guatemala. 81 p.
- Say, E., y Villalobos, M. (2012). *Sistemas agroforestales con cacao, competitividad, ambiente y cultura: una oportunidad para mejorar la cadena productiva y la calidad de vida de familias productoras en el país, la visión del CATIE -MAP*. Proyecto Cacao Centroamérica. <https://cadenacacaoca.info/>
- Umaña Calderón, M. E. (2013). *Anteproyecto de una planta de procesamiento para la elaboración de un producto tradicional y un producto funcional obtenido a partir del grano de cacao (Theobroma cacao L.) fermentado y no fermentado* Universidad de Costa Rica]. San José, Costa Rica. <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/>
- Wood, G. R. (2001). From harvest to store. In G. R. Wood & R. A. Lass (Eds.), *Cocoa* (4ta ed., pp. 444-504). Blackwell Science. <https://doi.org/10.1002/9780470698983.ch13>