

## Innovación tecnológica en cacao andino

### Producto 6: Prototipo de fermentador portátil ecológico, optimización del proceso de fermentación

Milber Ureña Peralta Ph D

Angélica Sandoval Aldana Ph D

2021



**FONTAGRO**



Códigos JEL: Q16

FONTAGRO (Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria) es un mecanismo único de cooperación técnica entre países de América Latina, el Caribe y España, que promueve la competitividad y la seguridad alimentaria. Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), FONTAGRO, de sus Directorios Ejecutivos ni de los países que representan.

El presente documento ha sido preparado por Milber Urueña, Angelica Sandoval.

Copyright © 2021 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional. Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Esta publicación puede solicitarse a:

**FONTAGRO**

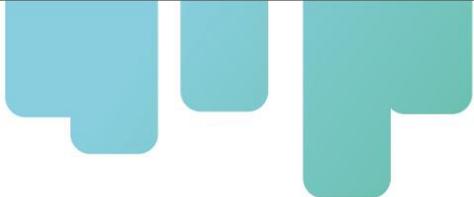
Correo electrónico: [fontagro@fontagro.org](mailto:fontagro@fontagro.org)

[www.fontagro.org](http://www.fontagro.org)



# Tabla de Contenidos

<b>Abstract</b> .....	<b>4</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>5</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>6</b>
<b>Objetivos</b> .....	<b>17</b>
<b>Metodología</b> .....	<b>17</b>
<b>Resultados y discusión</b> .....	<b>20</b>
Metrado de cargas .....	58
<b>ANEXOS</b> .....	<b>58</b>



## Abstract

For cacao beans it was designed a portable fermenter prototype. The design was thinking for field, it was built with low-cost materials all available in the local market, easy to use and maintain. Trials were carried out with Chunchu cacao and a mixture of Trinitadians grown in the Echarati district, Cusco Region, Peru. Also it was obtained field cacao bean storage prototype .

The fermenter was designed and developed in seven stages: Concept Obtaining, Literature Review, Model Design, Model Selection, Model Manufacture, Trial Testing, Final Prototype Design. The cacao bean storage prototype is one of the tested models. The fermenter and cacao bean storage have a capacity of 50 kg of cocoa beans and are made from discarded car tires, PVC pipes and fittings used in domestic water installations, polyethylene bags and microporous plates. Building the final model of the fermenter would cost less than 90 US dollars. An investment that is justified in better fermentation process, above all, by taking advantage of a disused and polluting material that are discarded tires.

## Key words

Cacao fermentation process, fermenter, cocoa, pneumatic, PVC, polyethylene.



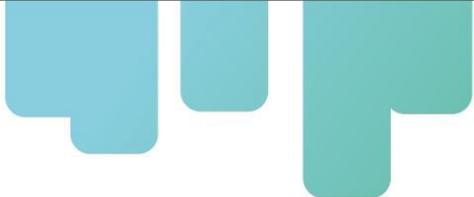
## Resumen

Para granos de cacao en baba, se diseñó y desarrolló un prototipo de fermentador portátil para el campo, construido con materiales de bajo costo y disponibles en el mercado local, de fácil manejo y mantenimiento. Se realizaron ensayos con cacao Chuncho y mezcla de trinitarios cultivados en el distrito de Echarati, Región Cusco, Perú. También se obtuvo un prototipo para almacenar granos de cacao en baba para el campo.

El fermentador se diseñó y desarrolló en siete etapas: Obtención del concepto, Revisión de literatura, Diseño de modelos, Selección del modelo, Fabricación del modelo, Pruebas de ensayo, Diseño final del prototipo. El prototipo para almacenar cacao en baba es uno de los modelos ensayados. El fermentador y el prototipo para almacenar tienen capacidad de 50 kg de granos de cacao y están hechos de neumáticos desechados de autos, tubos y accesorios de PVC utilizados en las instalaciones de agua para uso doméstico, bolsas de polietileno y planchas de microporoso. Construir el modelo final del fermentador costaría menos de 90 Dólares americanos; inversión que se justifica en una mejor fermentación, y, sobre todo, por el aprovechamiento de un material en desuso y contaminante que son los neumáticos.

Palabras clave:

Fermentación de cacao, fermentador, cacao, neumático, PVC, polietileno.



## Introducción

En América Latina y el Caribe, el cacao es cultivado desde México hasta Brasil. Cerca del 90% es cultivado por agricultores familiares, sector con alto nivel de atomización y bajo de organización e integración a la cadena de valor, quienes recurren a intermediarios para comercializar el grano, quienes a su vez lo venden a las grandes compañías, siendo unas pocas multinacionales las que concentran la transformación como la elaboración de chocolate.

La fermentación es uno de los procesos más importantes en el tratamiento poscosecha del cacao, pues de él depende las características de calidad que se espera para los diversos productos derivados. No es un proceso estándar para todo tipo de varietal debido a que hay otros factores agronómicos y climatológicos que determinan los parámetros de su control. Su mejora tecnológica es un desafío por alcanzar, sobre todo en beneficio de los pequeños productores, en términos de bajo coste, fácil manejo y mantenimiento, cuidado del ambiente y contribución a una economía circular.

### **Fermentación del grano de cacao**

La fermentación del grano de cacao consiste en una serie de cambios fisicoquímicos que generan el desarrollo del sabor y aroma a chocolate. La pigmentación interna pasa de un color violeta a uno marrón claro. El sabor astringente se reduce en los cotiledones. Se transforman los azúcares en alcoholes por las levaduras y en ácido acético por las bacterias acéticas. Durante el proceso existe una relación ordenada entre microorganismos y las variaciones de temperatura, pH y humedad, con la formación de alcoholes, ácidos y compuestos polifenólicos, que matan el embrión, disminuyen el sabor amargo y se producen las reacciones bioquímicas que forman el chocolate. Estas alteraciones químicas en el interior del grano dependen de la muerte de las células del cotiledón, con la consecuente degradación de sus membranas celulares y el aumento de su permeabilidad, facilitando el contacto entre los diversos componentes celulares y así los polifenoles, que producen el sabor astringente, pueden difundirse entonces hacia las células adyacentes, donde se encuentran con diversas enzimas que provocan reacciones hidrolíticas debido a las condiciones anaerobias del grano. Si las membranas celulares no se degradan, los polifenoles pasan al grano seco, provocando el color violeta del grano, lo que indica errores en el proceso fermentativo (Teneda, 2016).

### **Etapas de la fermentación del grano de cacao**

Desde un enfoque de procesos, considerando lo publicado por Teneda (2016) y Castillo (2019), el proceso fermentativo tiene dos subprocesos: hidrólisis y oxidación; teniendo el primero otros dos, el aeróbico y el anaeróbico; procesos que se presentan en la tabla 1 como bioestructura (Ureña et. al 2020).



Tabla 1. Bioestructura del proceso de fermentación de granos de cacao.

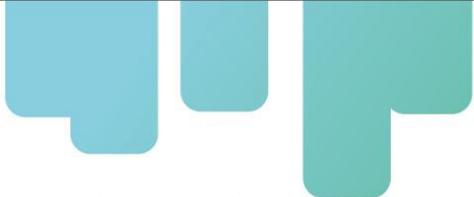
NIVEL	0	1	2
0	Proceso fermentativo del grano de cacao		
1		Proceso de hidrólisis	Transformación de azúcares a ácido acético
2		Proceso anaeróbico	Transformación de los azúcares del mucílago en alcohol etílico
2		Proceso aeróbico	Transformación del alcohol en ácido acético
1		Proceso de oxidación	Transformación de compuestos polifenólicos en productos complejos y aminoácidos volátiles solubles e insolubles

Fuente: Elaboración propia.

El proceso anaeróbico, considerando lo publicado por Castillo (2019), se da en las primeras 48 horas de la fermentación a temperaturas que llegan a los 45 °C y a pH de 3 a 5, lo que ocurre por la presencia de levaduras que consumen oxígeno en una pulpa que no permite la circulación del aire, transformando la glucosa en alcohol con aumento de temperatura (reacción exotérmica) y producción de ácido láctico. Conforme avance el proceso la pulpa se deshace y se escurre lo que permite que penetre aire, el pH ácido que predomina va de 3 a 4 con un ascenso rápido de la temperatura de 30 a 40 °C y aumento de la concentración de alcohol hasta alrededor del 12%, debido al consumo total del azúcar presente en el mucílago. Con la penetración del oxígeno y el aumento del pH se produce la muerte de las levaduras, dando por terminado el proceso anaeróbico.

El proceso aeróbico, considerando lo publicado por Castillo (2019), se da a partir del tercer día de fermentación en adelante (hay presencia de oxígeno) y es conocida como fermentación acética debido a que bacterias acéticas (*Acetobacter*) transforman el etanol en ácido acético por oxidación. Cuando la pulpa se escurre y voltea (remoción) a las 48 horas, se produce aireación que favorece el crecimiento de las bacterias aeróbicas, lo que se vuelve a repetir con la segunda remoción a las 96 horas. Con la temperatura, que puede llegar de los 45 a 51 °C en el segundo o tercer día de la fermentación y la penetración del ácido acético en el grano hace que este muera, con lo cual sus membranas celulares se degradan y aumentan su permeabilidad permitiendo el contacto entre los diversos componentes celulares haciendo que los compuestos del grano se mezclen y reaccionen entre ellos generando el sabor a chocolate, así como proporcionando la disolución y la difusión de los pigmentos (antocianinas) y alcaloides (teobromina y cafeína), que producen el sabor amargo al producto terminado.

El proceso de oxidación, considerando lo publicado por Castillo (2019), se inicia con la mayor penetración de oxígeno y consiste esencialmente en la oxidación y condensación de



los compuestos polifenólicos en productos complejos, aminoácidos volátiles solubles e insolubles que tienen poco o ningún sabor. Según Teneda (2016), las cianidinas desaparecen por completo al integrar parte de las reacciones bioquímicas ocurridas entre el tercero y quinto día de fermentación y las leucocianidinas aparecen entre el segundo y tercer día, pero luego desaparecen al combinarse con proteínas. Con la condensación oxidativa, disminuye el contenido de humedad hasta el punto en que la falta de agua detiene la actividad enzimática. Cuando el oxígeno tiene acceso a las células de los cotiledones durante la fase de condensación oxidativa, el color de la superficie de las almendras se vuelve pardo y esto se realiza en toda la almendra, conforme se inicia el secado y se facilita la penetración del oxígeno al interior del cotiledón.

### **Factores que influyen en el proceso de fermentación**

Los factores que influyen en la fermentación pueden ser clasificados en dos: los que se dan antes y durante el proceso. Del primer grupo son: el tipo de cacao, el manejo agronómico del cultivar, los factores de pos-cosecha y el tiempo de aguante de la mazorca. En el segundo grupo están: los microorganismos, la temperatura de fermentación, el tipo de cacao y tiempo de fermentación, la frecuencia de remoción, la temperatura del ambiente, la cantidad de granos a fermentar y el tipo de fermentación. A continuación, se abordan los del segundo grupo.

#### **➤ Microorganismos**

Al realizar la extracción los granos de cacao se encuentran estériles, pero son colonizados por una gran variedad de microorganismos provenientes de la misma vaina, de las manos de los manipuladores, de los insectos, de los recipientes usados para el transporte, etc. Los primeros microorganismos que se desarrollan son las levaduras, gracias a las condiciones iniciales en la pulpa del grano de cacao como el ambiente anaeróbico, el bajo nivel de pH. La fase inicial consiste en una fermentación alcohólica llevada a cabo por las levaduras, pertenecientes a los géneros *Saccharomyces spp.*, *Candida*, *Dedaryomyces*, *Hansenulaa*, *Kloeckera*, *Pichia*, *Rhodotorula*, y *Torulopsis*. Las especies encontradas con mayor frecuencia son *S. cerevisiae*, *Candidakrusei*, *Kloeckera apiculata*, *Pichia fermentans*, *Hansenula anomala* y *Schizo-saccharomyces pombe*. La gran mayoría de las levaduras son mesófilas, con una temperatura máxima de crecimiento entre 24 y 48 °C. Solo unas pocas (2%) son psicrófilas con una temperatura máxima de crecimiento por debajo de 24 °C. No hay levaduras que puedan crecer a 50 °C. La mayoría de las levaduras toleran un rango de pH entre 3 y 10, pero prefieren un medio ligeramente ácido con un pH de 4,5 a 6,5 (Teneda, 2016).

A 50 °C las levaduras dejan de crecer y son sustituidas por bacterias acéticas de los géneros *Acetobacter* y *Gluconobacter*, que aprovechan la aireación y el etanol para producir ácido acético. Este es un punto clave del proceso pues el ácido acético provoca una disminución mayor del pH que junto con el calor de la fermentación acaba matando a los brotes del interior de las semillas, pero no inactiva a las que han sido producidas durante la formación de dichos brotes. Además, los microorganismos presentes en la fermentación originan ésteres del acetato a partir de ácido acético, quedarán al chocolate su peculiar sabor. El pH óptimo de crecimiento está entre 5 y 6,5, aunque algunas especies pueden llegar a crecer a pH cercanos a 3. Estas bacterias llegan a la fermentación gracias a los insectos, especialmente a las moscas de la fruta (Teneda, 2016).



### ➤ **Temperatura de fermentación**

La temperatura dentro del proceso de fermentación juega un papel de gran importancia porque la gran parte de las reacciones que ocurren durante la fermentación son inducidas por la elevación de la temperatura de la masa de cacao durante la fermentación, también influye sobre la migración del ácido acético de la pulpa hacia la almendra, logrando así suprimir el poder germinativo del embrión (Castillo, 2019).

La fermentación debe realizarse en un sitio caliente que favorezca el aumento de la temperatura, lejos del recorrido del viento para evitar que la misma descienda y que las partículas que puedan venir en el viento no contaminen nuestra fermentación garantizando un proceso de fermentación completo y parejo. Para lo cual se puede construir una estructura que proteja al contenedor, de la incidencia directa de los rayos del sol, para evitar que la luz ultravioleta mate a los microorganismos beneficiosos. También se debe evitar que la lluvia llegue a los recipientes fermentadores, dado que la temperatura descendería matando a los microorganismos responsables de los diferentes tipos de fermentación y proporcionaría además humedad innecesaria, ya que la misma es provista por el mucílago de los granos de cacao. La muerte de las células del cotiledón, que acaece durante el segundo día de fermentación se produce principalmente por la alta temperatura, generada por la actividad de los microorganismos (Teneda, 2016).

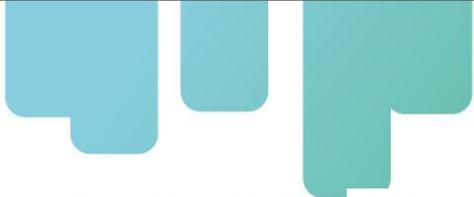
En los primeros días de fermentación la temperatura de la masa varía entre 45 a 50 °C, una variación normal dentro de este proceso, luego empieza de descender lentamente para volver a subir a 48 y 50 °C, luego de la primera remoción. El embrión en la almendra muere cuando la temperatura llega aproximadamente a 45 °C, marcando el inicio de los cambios bioquímicos que conducirán a la fermentación de los precursores del sabor y aroma del chocolate. Durante la fermentación hay variación de la temperatura, que es mayor en la masa que se encuentra en la parte superficial que la de la masa que se encuentra en el fondo del cajón. El comportamiento de la temperatura se puede ver afectado por la cantidad de masa fermentativa y el tiempo de mezclado o frecuencia de remoción (Castillo, 2019).

### ➤ **Tipo de cacao y tiempo de fermentación**

La fermentación del cacao CCN 51 dura 5 días. Existen varietales de cacao, que crecen en países como Venezuela, que necesitan menos días para su fermentación como es el caso de Cacao Criollo de cotiledón blanco, que requiere solo tres días; en cambio el Cacao forastero de cotiledón morado o púrpura necesita ocho días (Teneda, 2016).

Loo-Miranda et. al (2018), sobre la conductividad eléctrica de granos de cacao CCN 51 e ICS 6 producidos en Uchiza, Tocache, San Martín, Perú, reportan seis días de fermentación con 90% (1621,67  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y 87% (1098,00  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) de índice de fermentación, respectivamente.

Andrade-Almeida et al. (2019), sobre propiedades físicas de cacao ecuatoriano Nacional de Manabí y CCN 51 de Pedernales y cacao peruano CCN 51 e ICS 6 producido en Tocache,



reportan tiempos de fermentación (índices de fermentación) de 3 ( $77.66 \pm 1.33 \%$ ), 6 ( $58.86 \pm 1.45 \%$ ), 6 ( $80.68 \pm 1.85 \%$ ) y 5 ( $74.64 \pm 2.64 \%$ ), respectivamente.

Rivera (2018) para su estudio de variación de porosidad de granos de cacao durante la fermentación, utilizaron mazorcas maduras y sanas de cacao de las variedades CCN-51 (Colección Castro Naranjal) e ICS-6 (Imperial College Selection), los cuales provinieron del distrito de Uchiza, provincia de Tocache, región San Martín, Perú, con 6 ( $0,554 \pm 0,011$ ) y 5 ( $0,553 \pm 0,009$ ) días de fermentación, respectivamente.

Granos de cacao de 11 cultivares de Chunchu de Cusco fueron puestos en bolsas de tela para luego introducirlas en los cajones de fermentación, proceso que duró entre 4 y 5 días dependiendo del tamaño de las almendras (Rojas et al., 2017).

El tiempo de fermentación del grano del cacao Chunchu (*Theobroma cacao* L.), es en promedio 4 días en tres prototipos de fermentadores ensayados, destacándose un mayor porcentaje de fermentación, en el prototipo de cilindro de plástico de grado alimentario (Alegría, 2019).

Se caracterizaron fisicoquímica y organolépticamente pasta de cacao elaborada con granos de cacao (*Theobroma cacao* L.) variedad Chunchu de la cooperativa Agraria Cafetalera Alto Urubamba Ltda. 239, ubicado en la Ciudad- Quilla bamba, Cusco, Perú, los que presentaron una humedad de 7 % con 5 días de fermentación (Iman, y Quillilli, 2019).

Se fermentó 7 kg en cajas de madera cubiertas con hojas de plátano los frutos de cacao Chunchu y SHU-1, por 5 y 6 días, respectivamente (Ordoñez, 2020).

#### ➤ **Frecuencia de remoción**

El proceso de volteo tiene el efecto inmediato de enfriamiento, liberación de  $\text{CO}_2$  y aumento de la aireación y por consiguiente de la actividad de las bacterias acéticas. El fin de esta actividad es asegurar el grado de fermentación uniforme. El volteo debe empezar a las 48 horas de iniciada la fermentación, luego se lo hará cada 24 horas, es decir, una vez al día durante los 2 o 3 días restantes dependiendo del tipo cacao fermentado, pero siempre a la misma hora (Teneda, 2016).

La frecuencia de remoción o volteos de la masa en la fermentación en un cajón de madera son de gran importancia porque permite airear la masa, lo que favorece la fermentación logrando uniformidad y una distribución pareja de la temperatura, dado que esta es distinta en los diferentes niveles del fermentador; además una adecuada remoción también permite: facilitar la aireación, romper los granos adheridos (bolas conformadas por varios granos), prevenir la formación de mohos y hacer uniforme el proceso (Castillo, 2019).

La falta de remoción o su ejecución defectuosa, hace que gran proporción de la masa de cacao se quede sin fermentar, el volteo debe realizarse a las 24 horas en el caso de cacao criollo y cada dos días en el caso de forastero y trinitario, evitando así la proliferación de mohos y la desecación de las almendras que se encuentran en la superficie. En la remoción de la masa, las almendras o granos deben permanecer sin ser removidas, durante las primeras 36 horas, tiempo que dura la fase de fermentación anaeróbica; luego, es



necesario voltear la masa de cacao diariamente, es decir, cada 24 horas, para permitir la liberación del CO<sub>2</sub> generado en el proceso y que su lugar sea ocupado por aire con oxígeno que garantice el proceso de oxidación (Castillo, 2019).

➤ **Temperatura ambiente**

La temperatura ambiente es un factor que interfiere en la fermentación porque ayuda al incremento o disminución de la temperatura del proceso. Es de esperarse que una zona más fría la temperatura de fermentación aumente mucho más lento que en zonas calurosas, esto puede hacer que la fermentación se prolongue unos días más (si la temperatura ambiente influye negativamente) o que haya una sobre fermentación (si la temperatura ambiente ayuda al incremento de la temperatura de fermentación). Algunos autores no ponen mucha atención a la temperatura ambiente porque esta varía a lo largo del día y resulta difícil mantenerla constante, lo que implica que en las noches puede influir negativamente sobre la fermentación, he ahí la importancia de tener un fermentador lo más adiabático posible y un lugar adecuado para la fermentación. Las condiciones climáticas particulares durante el año, así como el genotipo, ejercen un papel importante en la fermentación y secado (Castillo, 2019).

➤ **Cantidad de granos a fermentar**

La cantidad de granos a fermentar o tamaño del lote, se encuentra ligado al grado de aireación y desarrollo del calor de la masa a fermentar; teniendo en cuenta que la cantidad de cacao a fermentar dependerá de la temporada de cosecha. La cantidad mínima de masa del cacao a fermentar en condiciones naturales fluctúa entre 35 y 450 kg (Castillo, 2019). El incremento de la aireación en la superficie de una gran cantidad de masa genera un rápido incremento de la temperatura en el centro de la masa (García, 2000). Se sugiere que para obtener una fermentación óptima se requiere un peso mínimo de 100 kg de granos; sin descuidar los aspectos antes mencionados (Hernández, 2010).

➤ **Tipo de fermentación**

Existen tres formas generalizadas de fermentar el cacao en campo a nivel de pequeños y medianos productores (asociaciones): en montón, en sacos y en cajón. Se tienen mejoras tecnológicas en fermentación utilizando la madera como material estructural del cajón, como el tipo Rohan (fig. 2) y la disposición de cajones en escalera, así como en los fermentadores de tambor rotatorio.

Los fermentadores se construyen de madera, porque este material garantiza un cacao de buena calidad, con buen olor, sabor, color y apariencia; se diferencian por su forma y tamaño (Teneda, 2016).

a) **Fermentación en montón**

En este sistema, se coloca sobre el piso una capa de hojas de plátano (musácea, perteneciente a la familia Musaceae) o esteras construidas con materiales vegetales secos, que sirve de base y facilita el drenaje del exudado. Los granos se colocan sobre las hojas formando rumas que se cubren con el mismo tipo de hojas y en ocasiones con sacos de yute para evitar la fuga de calor. Los montones no deben estar expuestos directamente al sol, por eso se construyen cobertizos cuya base estará aproximadamente a 80 cm del suelo. Las remociones se

efectuarán a intervalos de 48, 72 y 96 horas, para tener un cacao bien fermentado, con un índice de fermentación por encima del 90 %. La caída de temperatura se puede regular disminuyendo o aumentando el tamaño de los montones, según la necesidad. Tiene la ventaja de fermentar cualquier volumen y ocasiona costos bajos. Los granos que están en el centro del montón son los que se fermentan más rápido y de mejor manera, por lo que es necesario que la remoción se realice de manera homogénea, para que todos los granos se fermenten de manera uniforme (Teneda, 2016).

La fermentación en montones consiste en amontonar el cacao en baba sobre un tendal de caña, madera, cemento o sobre hojas de plátano a fin de permitir el drenaje de la baba del cacao. Los montones deben cubrirse con hojas de plátano para evitar la fuga de calor. En la fermentación en montones solo fermenta bien la parte superficial, esto se debe a la aireación. Una vez transcurrido las 48 horas se realiza el volteo, cubriendo los granos con hojas nuevas otra vez. Este método tiene un costo mínimo y el tamaño del montón varía de acuerdo con el cacao cosechado, siendo la cantidad mínima para generar el calor necesario 36 kg (80 libras) de cacao en baba (Castillo, 2019).



Fermentación en montón



Fermentación en saco



Fermentación en cajón

[https://www.academia.edu/39401175/Fermentaci%C3%B3n\\_de\\_cacao](https://www.academia.edu/39401175/Fermentaci%C3%B3n_de_cacao)



III CICLO DE CONFERENCIAS - 2021

Figura 1. Fermentación en montón, en saco y en cajón.  
Fuente: Mejía, J. (2019).

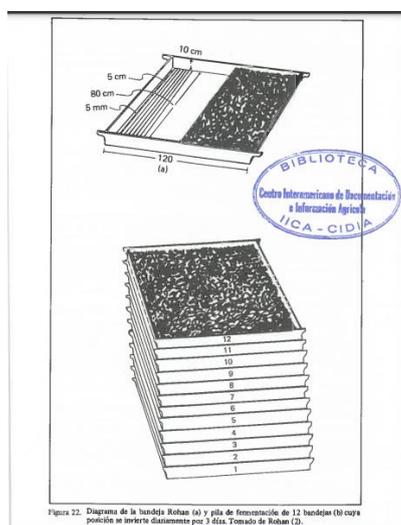


Figura 22. Diagrama de la bandeja Rohan (a) y pila de fermentación de 12 bandejas (b) cuya posición se invierte diariamente por 3 días. Tomado de Rohan (2).



Fermentación rápida en gavetas o bandejas Rohan

Figura 2. Fermentación en cajón Rohan.

Fuentes: Enríquez, G. A. (1985); Mejía, J. (2019).



b) Fermentación en saco

La fermentación también se efectúa en costales de polietileno o yute, donde se colocan las almendras, se cierran y se los deja fermentando en el piso. Se los puede colgar para que tengan mejor aireación. No es muy recomendable debido a que las almendras presentan un elevado porcentaje de granos violáceos y pizarrosos porque la aireación es muy pobre y la humedad alta (Teneda, 2016).

Los sacos con cacao fresco cuelgan para que escurra el mucílago y se fermenten los granos. También acostumbran a dejar los sacos amontonados en el piso, dejándolo por 5 a 7 días, o los días que necesite el tipo de cacao. El método no es muy aconsejable ya que se dificulta las remociones necesarias, resultando un proceso fermentativo muy heterogéneo con un bajo porcentaje de granos fermentados y con un elevado porcentaje de granos en mal estado, en este tipo de fermentación existe gran dificultad con la retención del calor, debido a los poros que permite la entrada de aire y salida del calor. “Este método no se recomienda porque ocurre una mala fermentación del grano originando un alto porcentaje de granos violetas y pizarrosos” (Castillo, 2019).

c) Fermentación en cajón

Para este tipo de fermentación se colocan las almendras frescas dentro de cajones fermentadores por un período de 5 días. La altura de la masa de almendras debe ser nivelada uniformemente y cubrir los cajones con hojas de plátano o costales de yute, a fin de mantener la humedad y conservar el calor desprendido por la fermentación. La capa de granos frescos no debe superar los 70 centímetros, ya que se corre el riesgo que se compacten, se reduzca la aireación de los granos y se dificulte el volteo. Existen dos variables que afectan la fermentación en este tipo de fermentador, que son: la profundidad de la masa de almendras, que debe tener un espesor mínimo de 20 cm y la duración de la fermentación, que debe ser la precisa para el tipo de cacao (Teneda, 2016).

Dentro de la fermentación en cajones se tiene dos tipos de cajones; fermentación en cajones de madera a un nivel y fermentación en cajones de madera tipo escalera. En ambos tipos de fermentadores se dispone de un sistema de cajas, en el fondo de las cajas deben tener ranuras no menores de 0.5 cm, ni mayores de un cm y además deben estar separados del suelo unos 20 cm y el grosor de la madera deber ser de dos cm. Este método es ventajoso porque se puede fermentar cualquier volumen, por ello es que sus dimensiones (tabla 2) pueden variar y son muy utilizados por pequeños productores, pues las cajas son fáciles de manejar; son construidos con tablones de maderas finas, resistentes a la humedad, tales como el cedro, nogal y otros de tipo blanco que no desprendan sustancias extrañas que van a interferir en la calidad final del cacao (Castillo, 2019).

Tabla 2. Dimensiones y capacidad de los cajones fermentadores de cacao.

Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)	Kilos de cacao	
			Fresco	Seco
1,00	0,40	0,60	378	141
1,50	0,80	0,80	648	246
2,00	0,80	0,60	756	288

Fuente: FEDECACAO, reportado por Hernández (2010)

Los cajones de madera tipo escalera (fig. 3) están formados por una o varias series de tres cajones, colocados a diferentes niveles como una escalera; el cacao fresco recién cosechado se coloca en el cajón superior y a la primera remoción (48 horas), se coloca al siguiente cajón y luego a igual tiempo al cajón de abajo, lo que facilita la remoción de la masa y proporciona la aireación a la misma. La importancia en el cajón tipo escalera es que facilita el volteo de los granos y garantiza un buen fermentado (Palacios, 2008).



Figura 3. Fermentación en escalera de cajones.

Fuente: Palacios (2008).

Uno de los principales motivos por lo que se utilizan cajas de madera y no de otro material, es porque en el proceso de fermentación se eleva la temperatura y si se utiliza otro material como aluminio o plástico en la noche se enfría provocando un gradiente de temperatura muy elevado que perjudica la fermentación del cacao. Otro aspecto que se debe tener en cuenta es el lugar donde se colocará los cajones, estos deben estar colocados en sitios cubiertos para tratar de mantener la temperatura constante y la fermentación sea completa y pareja. En la actualidad la fermentación del cacao en cajas de madera es uno de los tipos de fermentación más usados y que mejores resultados en cuanto a calidad ha dado; gran parte de los estudios e investigaciones se han hecho utilizando estos tipos de fermentadores (Castillo, J. 2019).

Doce bandejas de madera Rohan se apilan como máximo unas sobre otras, siendo cada una de 120 x 80 x 10 cm de largo x ancho x altura, respectivamente. El factor clave en la bandeja de Rohan es el grosor de la capa de almendras. La máxima fermentación se produce en los primeros 10 cm de profundidad. El fondo de la bandeja debe llevar rendijas de 5 mm cada 5 cm, para permitir la salida de los exudados de las almendras. No es necesario estar removiendo las

almendras, pero sí es recomendable rotar diariamente por tres días la posición de las bandejas en la pila de 12 bandejas. El método Rohan permite sacar el cacao en la misma bandeja, disminuyendo a la mitad la cantidad de las almendras fermentadas por caja (Enríquez, 1985).

d) Fermentación en tambor rotatorio

Se trata de un tambor usado en otros procesos (fig. 4), al que se le han hecho modificaciones en el sistema de remoción interna, usando un eje con paletas y en el sistema de frenado, para la carga y descarga. Permite fermentar hasta 250 kg de cacao, que es aproximadamente la producción de una hectárea de cacao. El tambor necesita de un lugar cubierto con ventilación, con un piso que tenga canales para recoger y drenar el exudado. Este tipo de fermentador, puede ser cargado y descargado por una sola persona, que puede remover el cacao cada 24 horas sin ayuda, porque las paletas internas hacen todo el trabajo. Permite obtener mejor calidad y rendimiento del grano fermentado, pues se disminuyen los riesgos de contaminación al ser un barril cerrado, que se abre solo para la carga y descarga (Teneda, 2016).

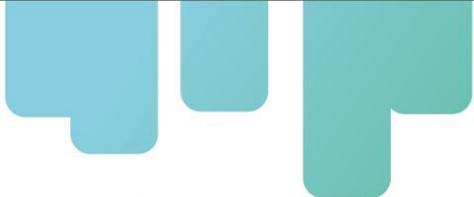


Figura 4. Fermentación en tambor rotatorio.

Fuente: Teneda (2016)

Uno de los aspectos importantes en la fermentación es el alza de la temperatura y la correcta aireación de la masa, además en la zona central de una masa fermentada no se consigue un 100% de almendras fermentadas, siempre hay un grupo de almendras que no alcanza una buena fermentación, especialmente si se usan cajas grandes, para evitar esto se han ideado los tambores giratorios para la fermentación de cacao, de tal manera que la masa se airea permanentemente (Enríquez, G. A. 1985).

Los tambores giratorios son contruidos de madera (fig. 5) y en estos puede conseguirse la mezcla completa de la masa con un simple movimiento de palanca; de esta manera se eliminan los volteos de las almendras y no se pierde temperatura por tener que sacar la masa del fermentador. Se recomienda que la capacidad máxima de granos a fermentar sea de 250 kg, aunque hay algunos tambores



construidos para mayor capacidad que funcionan con éxito. El tambor debe colocarse en un lugar cubierto con adecuada ventilación y protegidas de las corrientes de aire (Castillo, 2019).

En Colombia se ha hecho un estudio por medio del “Centro de Investigación para el mejoramiento de la Agroindustria Panelera” (Espinoza et al., 1998) que garantiza que con este sistema hay un incremento del 14% de granos bien fermentados; además se obtiene un grano con mayor volumen, mejor color, olor y textura comparado con los granos fermentados en cajón. Son pocas las investigaciones y publicaciones que se han hecho sobre las mejoras del cacao en este tipo de fermentadores debido a su costo; Enríquez (1985) recomienda un estudio cuidadoso del número de giros y el tiempo para hacerlo en cada localidad, dependiendo del material. En Brasil se ha probado con éxito un mecanismo de reloj para mover un tanque muy grande en forma de barril, pero es muy costosa la inversión inicial (Castillo, 2019).

En Perú son pocas las zonas que utilizan este tipo de fermentadores debido a su alto costo. En el 2007 en el programa de desarrollo alternativo y la fábrica FADESA en su afán de contribuir al mejoramiento de la calidad del cacao, presentó el diseño del fermentador tipo giratorio (réplica modificada del fermentador rotatorio colombiano) que tiene capacidad para fermentar de 250 kg, esto se dio en la zona del VRAE. Entre las ventajas que proporciona la fermentación en el Tambor Giratorio se tiene que el grano está más hinchado, reduciendo la cantidad de pasillas, lo que hace que el cacao fermentado tenga mejor aspecto físico, y mayor rendimiento en peso. También, se obtiene mayor cantidad de granos fermentados, lo que permite que al pasar al proceso de secado este sea más uniforme y rápido, así como, que la fermentación es más homogénea respecto a los otros tipos de fermentadores, es de fácil manejo y remoción de la masa, lo que finalmente se traduce en un grano de cacao de mejor calidad y un mayor rendimiento (Castillo, 2019).

## Objetivos

### Objetivo general:

Diseñar y desarrollar un prototipo de fermentador de cacao portátil para el campo.

### Objetivos específicos:

- ✓ Obtener un prototipo de fermentador de cacao portátil para el campo, que en comparación con otros usados actualmente tenga similar eficacia, mejor control manual del proceso y de higiene, mayor duración, de uso sencillo, de fácil y económico mantenimiento, de cómoda movilidad por todo tipo de terreno, de construcción sencilla, hecho de material disponible en el comercio cercano a la zona de producción y de bajo costo final.
- ✓ Contribuir con el cuidado del ambiente y la economía circular al reutilizar materiales que constituirán el prototipo de fermentador, que sean de uso prolongado y bajo coste.

## Metodología

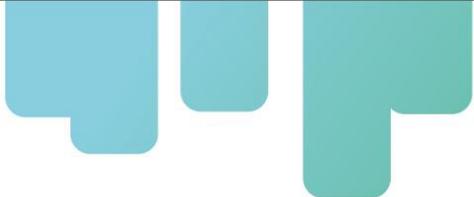
El fermentador se diseñó y desarrolló en siete etapas propuestas para el proyecto: Obtención del concepto, Revisión de literatura, Diseño de modelos, Selección del modelo, Fabricación del modelo seleccionado, Pruebas de ensayo y Diseño final del prototipo. El proceso propuesto fue concebido considerando las 12 etapas de Fuller (1994), 11 de Royal Greenland (Traill y Grunert, 1997), las 5 de Dym y Little (2006), las 28 de Lerma (2010), las 7 de Ulrich y Eppinger (2013) y las 6 etapas de Castillo (2019).

### 1. Obtención del concepto

A través de entrevistas con académicos y profesionales relacionados con el sector cacaoero peruano, se generaron ideas sobre el cómo debería ser el fermentador a diseñar, para que de ellas se pueda formular el concepto del producto, a partir del cual se obtendría el diseño y se desarrollaría el prototipo. Defínase concepto de producto como la integración de ideas relacionadas a las características estructurales y funcionales de lo que se espera conseguir.

### 2. Revisión de literatura

A través de una exhaustiva búsqueda de información sobre los tipos de fermentadores que se han diseñado y construido para granos de cacao, se seleccionó la que podría ser utilizada para el diseño del prototipo teniendo en cuenta el concepto de producto previamente definido. De preferencia la búsqueda estuvo enfocada en la región americana y sobre todo en la zona cacaoera.



### **3. Diseño de modelos**

A partir de la información recabada, se inició el proceso de generación de bocetos iniciales del prototipo de fermentador, buscando cumplir gráficamente con el concepto de producto. Se llegó a esbozar la estructura de soporte, el contenedor de la masa de granos de cacao y aspectos funcionales a través de los elementos que cumplirían con tales funciones. Los esbozos se llevan a plano generándose los modelos.

### **4. Selección del modelo**

Se seleccionó el modelo por cumplir mejor el concepto de producto. Para ello se generaron tablas de comparación de las características estructurales y funcionales de los modelos, así como los costes correspondientes. Es un análisis de costo beneficio y de ventajas y desventajas.

### **5. Fabricación del modelo seleccionado**

El modelo seleccionado fue construido de acuerdo con el plano elaborado a partir de ajustes de métrica de sus componentes aplicando estudios de simulación y optimización, así como de la elección de los materiales de construcción por funcionalidad, disponibilidad y coste.

### **6. Pruebas de ensayo**

Se realizaron pruebas preliminares en el laboratorio de poscosecha y control de Calidad de la Universidad del Tolima en Colombia, trabajando con clones de cacao de la región de San Bernardo – corregimiento del municipio de Ibagué. Para lo cual se dispuso de 200 kg de mazorca que se fermentaron en condiciones controladas durante una semana.

De igual forma se hicieron pruebas en la planta piloto de la Facultad de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional agraria La Molina, donde el modelo construido entró en acción con granos de cacao CCN 51 proveniente de la región de San Martín. Se efectuó la determinación de las cinéticas de calentamiento del prototipo bajo condiciones controladas del ambiente. Para ello, el prototipo funcionó dentro de una cámara donde se expuso a la temperatura constante de 28 °C de 8:00 a.m. a 8 p.m. y de 22 °C de 8:00 p.m. a 8:00 a.m., buscando simular condiciones ambientales diurnas y nocturnas, respectivamente. La remoción o volteo de la masa de granos de cacao se realizó después de las 48 horas de fermentación y por cada 24 horas. Se registraron valores de temperatura del interior de la masa de granos de cacao durante el proceso de fermentación.

Las pruebas de campo se realizaron en la región del Cusco, en el distrito de Echarati, provincia de Quillabamba. Se trabajó con agricultores que integran la Asociación de productores agropecuarios Valle de Echarati. Se utilizaron granos de cacao en baba Chunchu del Cusco y mezcla de trinitarios. Se hicieron pruebas con dos modelos de fermentador, el utilizado en las pruebas en planta piloto y otro con métricas mayores; así mismo, se hicieron pruebas en cajones de madera ubicados en las instalaciones de la Asociación. La ubicación de los prototipos para los ensayos fue en el terreno de cultivo bajo árboles de cacao. El peso de la masa de granos de cacao en baba para todos los ensayos fue de 50 kg. Se registraron las temperaturas del



interior de la masa de granos de cacao durante la fermentación en prototipos y cajones con un medidor de temperatura digital (-50.0 a 70.0 °C 3Scientific SH-144-USA). La remoción de los granos de cacao se realizó después de las 48 horas de fermentación y por cada 24 horas hasta el término de la misma.

Se utilizó un inóculo para la fermentación en cada prototipo y caja de fermentación. Se elaboró 11 L de cultivo microbiano en sustrato líquido en base a una cepa de levadura LEV.F2.05. Dicha cepa fue aislada de sistemas de fermentación de granos de cacao de 3 días y descrita fenotípicamente en el 2019. Posteriormente, en el 2021, fue identificada molecularmente como *Saccharomyces cerevisiae* al presentar una similitud superior al 99% con dicha especie en base a la secuencia de la región 1-4 del gen ITS. Se utilizó como sustrato líquido el medio YDP (de las siglas en inglés yeast-peptone-dextrose broth), el cual se describe como un medio óptimo para el crecimiento microbiano de levaduras. La concentración celular final obtenida del escalamiento final de cultivo fue de  $1.1 \pm 2.4 \times 10^7$  células/mL.

Para las pruebas de campo se aplicó para cada uno de los parámetros de control medidos un Diseño completo al azar para determinar por análisis de varianza (ANVA) si hay o no diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre tratamientos de un solo factor denominado modelo de fermentador. Así mismo, se aplicó un análisis de comparación de medias LSD si se encontró diferencias significativas. Los parámetros de evaluación fueron: grado de fermentación logrado, temperatura interna de masa de granos, índice de fermentación, índice de grano, pH, acidez, polifenoles, capacidad antioxidante.

Con los resultados obtenidos a partir de los parámetros evaluados y aspectos funcionales y de manejo del modelo ensayado, se tuvo que realizar modificaciones al mismo, construyéndose un nuevo prototipo que entró a prueba de ensayo en las postrimerías del proyecto. Se evaluó el grado de fermentación alcanzado y la cinética de temperatura en el interior de la masa de granos en fermentación.

## **7. Diseño final**

Considerando los resultados de las pruebas de ensayo, se determinó el modelo final del prototipo de fermentador.

## Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados por etapas del proceso de diseño y desarrollo del prototipo de fermentador de granos de cacao.

### 1. Obtención del concepto

Para obtener el concepto del producto, se partió de la necesidad que impulsó el establecimiento de los objetivos planteados que nace de una problemática generalizada entre los pequeños y medianos productores peruanos en cuanto al tratamiento poscosecha del cacao, el que debe mejorar considerando el lograr obtener el mayor valor agregado a su producción, sobre todo en el proceso de fermentación que se realiza en montones, sacos y cajones, siendo estos últimos los utilizados con mejor acondicionamiento tecnológico si se trata de mayores producciones o actividades de asociaciones de productores (fig. 7) que ofrecen el fermentado y secado del grano en baba transportado en baldes o sacos hasta sus instalaciones.



Figura 6. Cajones de fermentación en galpón cubierto y en campo.  
Fuente: Elaboración propia.

Considerando el estado del arte de la fermentación del cacao en las zonas estudiadas de San Martín y Cusco, que involucra pequeños y medianos productores y asociaciones, así como la información presentada en la Introducción del presente informe, se definió el concepto del producto que fue el punto de partida para el diseño y desarrollo del prototipo: *“Fermentador portátil de grano de cacao en baba, de fácil construcción, operación y mantenimiento en campo a bajo coste, con el que se obtiene granos fermentados y mucílago con calidad sensorial, higiénica y sanitaria”*.

### 2. Revisión de literatura

A continuación, se presenta el resultado de la búsqueda bibliográfica referida a los tipos de fermentadores que se han diseñado y construido para granos de cacao, seleccionados según su contribución para el diseño del prototipo teniendo en cuenta el concepto de producto previamente definido, así como de materiales que demandaría su construcción.

Aka et al. (2018) diseñaron un fermentador para granos de cacao (fig. 8) considerando que el equipamiento de la fermentación es importante para

conseguir el aroma final del chocolate. El nuevo tipo de fermentador cilíndrico rotativo (FCR, por sus iniciales en inglés), fue diseñado para mejorar la fermentación del cacao que es un proceso que sigue siendo difícil de controlar debido a la naturaleza espontánea de la microflora. Se analizaron los rendimientos de este fermentador y se compararon con los del fermentador tradicional de caja de madera (TWB, por sus iniciales en inglés) que se utiliza habitualmente en las explotaciones agrícolas.

Durante los 6 días de fermentación en ambos fermentadores, se controló el crecimiento de microorganismos como levaduras, bacterias lácticas, bacterias acéticas, bacilos y mohos, así como los cambios químicos y físicos del cacao en fermentación. Los resultados mostraron que en el fermentador (FCR) se observó un rápido aumento de la temperatura en el curso del proceso de fermentación, con una temperatura que alcanzó los 51°C en 73 h, en comparación con el fermentador tradicional (48°C en 118 h). Esto condujo a la obtención de una mayor proporción de granos marrones en el fermentador FCR según la prueba de corte, lo que es indicador de una buena fermentación. Esta proporción fue del 94,44% para la FCR y del 85,88% para el TWB. Además, la optimización del calor generado en el fermentador FCR permitió un pardeamiento normal (el nivel de gris final fue de 77 en ambos fermentadores) a pesar de la modificación del orden de crecimiento de la microbiota (crecimiento temprano de las bacterias acéticas y crecimiento atrofiado de las levaduras en FCR, pero no para TWB). Las altas proporciones de granos marrones en FCR sugieren que este fermentador experimental (prototipo) puede contribuir a la mejora de la calidad estándar de los granos de cacao (Aka et al., 2018).

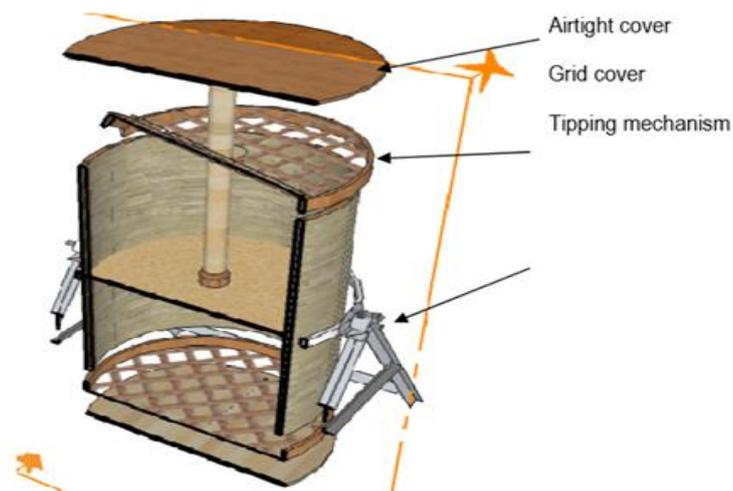
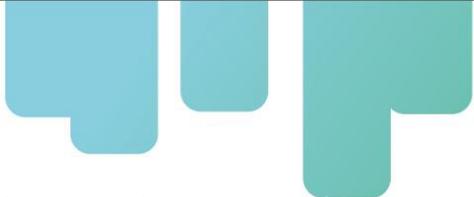


Figura 8. Fermentador cilíndrico experimental con volteo rotatorio.

Fuente: Aka et. al (2018).

El fermentador experimental es cilíndrico con 28 cm de radio de sección transversal circular y la capacidad es de 150 kg de cacao en grano fresco. La altura del cilindro (1,44 m) permite ocupar la mitad del fermentador cuando está en posición vertical durante las fases de fermentación alcohólica y acética. El fermentador se hizo con un marco de madera y su aislamiento térmico fue logrado por la presencia de fibra de coco, también tiene dos pares de tapa de cierre, uno para la parte superior y el



segundo para la parte inferior. En cada par de cubiertas de cierre, una está hecha de ratán tejido con rejilla para permitir el flujo de aire durante el giro en la fase aeróbica o acética, y la segunda, que es hermética, para la fase anaeróbica de la fermentación. Además del fondo, la tapa hermética tiene un agujero para facilitar la evacuación del mucílago producto del fermentado. En este fermentador, el proceso de giro consiste en quitar la tapa de cierre, luego hacer dos rotaciones del fermentador en sentido contrario y volver a poner la tapa de cierre y la posición vertical del fermentador. La rotación fue posible por el mecanismo de volteo (Aka et al., 2018).

Los resultados mostraron que el cacao fermentado en tres fermentadores da diferentes valores de temperatura. El valor más alto se obtuvo en el fermentador de este experimento (FCR). Durante la fermentación, la población de la microflora crece de forma diferente, pero en el mismo orden, y los valores de las medias en el fermentador se aproximan a los de otros estudios. Se observa que el aislamiento y la función del fermentador fue el responsable de esta diferencia de temperatura. Sin embargo, el FCR indujo una mejor calidad de la fermentación a partir de los cuatro días. Un cambio en el orden de aparición de la microbiota durante la fermentación provoca un retraso en el pardeamiento de los granos. El FCR fue la solución para mejorar la calidad de la fermentación y garantizar el sabor a chocolate a partir del cuarto día (Aka et al., 2018).

Lazarte y Delgado (2018) diseñaron un fermentador para granos de cacao (fig. 9) que se ajusta a las necesidades de los artesanos del cacao según los procedimientos tradicionales utilizados. El diseño del recipiente comenzó con la selección adecuada de la madera para que no impregne el producto de aroma o sabor. Se buscó monitorizar parámetros importantes del proceso como la temperatura y el pH del fermento y realizar un procedimiento de mezcla en el mismo recipiente mediante varios patrones de movimiento para conseguir una reordenación uniforme de las semillas; esto evita remover manualmente las semillas que suelen acabar golpeadas y maltratadas, reduciendo la calidad del producto final. El movimiento también permite mantener las semillas aireadas durante la fermentación.

El prototipo, basado en la información de los sensores y un motor eléctrico como actuador para controlar el movimiento y un programa desarrollado para el proceso, se cumplió con el objetivo de conseguir un mejor control de los parámetros de procesado, una reducción de la mano de obra con un aumento de la tasa de producción y mejores ingresos y condiciones de vida de la población rural dedicada a esta actividad económica. Asimismo, dar mayor valor agregado al producto, promoviendo la incorporación de más cacaocultores, incluyendo a las comunidades nativas (Lazarte y Delgado, 2018).



Figura 9 y 10. Fermentador de caja con volteo rotatorio.

Fuente: Lazarte y Delgado (2018).

Para las pruebas realizadas con el fermentador, de  $0.00177 \text{ cm}^3$ , se utilizó el cacao del tipo criollo, y un peso aproximado de 410 gramos. El proceso de purificación funcionó, y se obtuvo un abundante escurrimiento de jugo, que permitió medir fácilmente el pH, que llegó como valor máximo a 6. Al aumentar la temperatura, la cantidad de zumo se redujo y se hizo más espeso con una consistencia más densa y el pH se redujo a 3,37). Se confirma que el movimiento del recipiente permitió una correcta aireación, con lo que el mecanismo. El resultado final es un cacao con un aroma muy fuerte y un color atractivo, lo que permite concluir que el equipo es adecuado para llevar a cabo el proceso de fermentación con éxito. Existe una dependencia entre el nivel de pH y el calor que mantiene la fermentación y es importante que la temperatura tenga un mínimo de  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  y no supere los  $45^\circ\text{C}$  de lo contrario el resultado genera un producto con poco aroma y un color muy oscuro y de sabor algo ácido (Lazarte y Delgado, 2018)

Castillo (2019) diseñó un fermentador de acero inoxidable para granos de cacao (fig. 10) que mejoró las condiciones del proceso sin alterar su calidad final. En él se facilita la remoción y aireación de los granos, se monitorea el aumento de temperatura y la producción de  $\text{CO}_2$  y Oxígeno. El diseño incluye el análisis mecánico de los diversos componentes del fermentador. En una primera etapa se realizó una investigación acerca del tema. Se estudió lo avanzado en distintos países identificando que tradicionalmente se utilizan cajas de madera, las cuales presentan principalmente como desventajas: falta de uniformidad de temperatura durante el proceso, dificultad para la remoción de los granos y la fácil contaminación de las cajas (crecimiento de microorganismos inadecuados que contaminan el proceso). A través de este análisis previo se obtuvieron datos y parámetros relevantes para el diseño y construcción del primer prototipo.

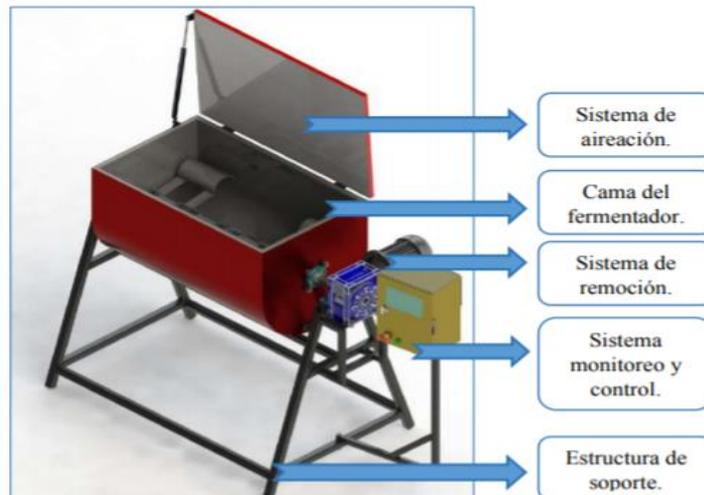


Figura 10. Fermentador de acero inoxidable.  
Fuente: Castillo (2019).

Teniendo el diseño y la forma del fermentador a construir, con un contenedor de 0.6 de diámetro y un metro de longitud, para una capacidad de 81 kg, se realizó el análisis mecánico de las diversas partes (cama, sistema de remoción, estructura de soporte). Como resultado final se compararon los datos obtenidos durante la fermentación tradicional en cajas de madera con los del prototipo (Castillo, 2019).

Finalmente se concluyó que una fermentación monitoreada mejora las condiciones que influyen directamente en la calidad de los granos de cacao, como el lograr la uniformidad de la temperatura con una adecuada remoción y por consecuencia una buena aireación de los granos, así como mejorar la higiene del proceso y minimizar la contaminación del grano de cacao (Castillo, 2019).

Alegría (2019) reportó la evaluación de tres prototipos de fermentadores (fig. 11, 12 y 13): clásico de madera cuadrada (F1), prototipo cilíndrico de plástico de grado alimentario (F2) y prototipo clásico de gaveta de madera tipo ROHAN (F3); en su tiempo de fermentación y sus características fisicoquímicas, así como la evaluación sensorial de sus productos.

El prototipo cilíndrico de plástico de grado alimentario (F2), tiene como medidas 65 cm de largo y un ancho de 28.50 cm de diámetro, con perforaciones. Las características del cilindro de plástico según la empresa ESPORMAPO S.R.L. son:

- a) Capacidad: 60 L (15 gal).
- b) Material: Polietileno de Ultra Peso Molecular de grado alimentario.
- c) Densidad: 0.93 g/cm<sup>3</sup>.
- d) Espesor: 3.5 mm.
- e) Diámetro: 285 mm.
- f) Altura: 580 mm.
- g) Usos: Productos Agro Industriales.
- h) No modifican olores, colores y sabores.
- i) Resisten al desgaste, impacto, oxidación y corrosión.
- j) No transmiten sustancias tóxicas.

- k) Propiedades adicionales: Alta resistencia química, al desgaste y corrosión.

El prototipo clásico de gaveta de madera tipo ROHAN (F3), sus medidas son de largo 60cm x ancho 50cm y alto 15cm; con perforaciones de 0.5 cm de diámetro y 5 cm de distancia.

Las evaluaciones de estos prototipos permitieron tener las conclusiones siguientes:

- a) El tiempo de fermentación del grano del cacao Chuncho (*Theobroma cacao L.*), es en promedio 96 horas por cada prototipo, destacándose un mayor porcentaje de fermentación, en el prototipo de cilindro de plástico de grado alimentario.
- b) La evaluación en los procesos de fermentación del grano del cacao Chuncho (*Theobroma cacao L.*), tienen influencia en los parámetros fisicoquímicos, indicando que el mejor comportamiento es el prototipo de cilindro de plástico de grado alimentario.
- c) En la diferenciación de los parámetros físicos: Temperatura, porcentaje de fermentación y frecuencia de remoción y fisicoquímicos: Humedad, acidez, pH, y grasa, del grano del cacao Chuncho (*Theobroma cacao L.*), el prototipo de cilindro de plástico de grado alimentario, muestra los mejores valores por facilitar la fermentación en estado sólido, que muestran los prototipos evaluados.
- d) En la evaluación sensorial de los atributos de aroma, sabor, color, astringencia, amargor y la acidez, del grano del cacao Chuncho (*Theobroma cacao L.*), fermentado, seco y molido, presenta los mejores atributos establecidos por el panel seleccionado, en el prototipo de cilindro de plástico de grado alimentario.
- e) La optimización mediante la superficie de respuesta en los atributos de aroma, sabor, color, astringencia, amargor y la acidez muestran una optimización del 94.9%.
- f) En la evaluación de los costos de los prototipos para el proceso de fermentación, se destaca el prototipo de cilindro de plástico de grado alimentario, con un valor de 255 soles por tres unidades, para su puesta en marcha con una carga de 30 kilogramos y por su mayor tiempo de depreciación.



Figura 11. Prototipo F1. Cajón de madera clásico  
Fuente: Alegría (2019).



Figura 12. Prototipo F3. Gaveta de madera tipo ROHAN  
Fuente: Alegría (2019).



Figura 13. Prototipo F2. Cilindro de plástico de grado alimentario  
Fuente: Alegría (2019).

### 3. Diseño de modelos

A continuación, se presentan los bocetos de cuatro modelos del prototipo de fermentador como imágenes en 3D, buscando cumplir gráficamente con el concepto de producto. Se llegó a esbozar la estructura de soporte, el contenedor de la masa de granos de cacao y aspectos funcionales a través de los elementos que cumplirían con tales funciones. Para este diseño se pensó en trabajar con llantas descartadas por uso, considerando que hoy en día, los neumáticos constan de casi un 19 por ciento de caucho natural y un 24 por ciento de caucho sintético, que es un polímero plástico. El resto de la composición es metal y otros materiales. La producción de neumáticos aún tiene grandes consecuencias medioambientales, como la deforestación continua, el empleo de combustibles fósiles perjudiciales en la fabricación de cauchos sintéticos o el proceso de ensamblaje. La fabricación de neumáticos modernos gasta en torno a 32 litros de petróleo, mientras que los neumáticos de los camiones consumen 100 litros (Root, 2019).

La trayectoria de los neumáticos usados es positiva en muchos sentidos. Por ejemplo, el reciclaje de los restos de neumáticos en productos como parques infantiles, campos deportivos y materiales de construcción ha aumentado mucho con el paso del tiempo. La USTMA (Asociación de Fabricantes de Neumáticos de Estados Unidos) afirma que la reutilización de los neumáticos ha pasado de un 11 por ciento en 1990 a un 81 por ciento en 2017. Pero dicha cifra tiene una salvedad importante: incluye los denominados «combustibles derivados de neumáticos», o la quema de neumáticos para obtener energía (Root, T. 2019).

En el primer modelo (fig. 14) se tiene como estructura de soporte un conjunto de neumáticos o llantas unidas por ocho tubos que las atraviesan; estructura que a su vez cumple la función de aislar térmicamente el proceso de fermentación de cacao. Cabe mencionar que en todos los modelos se piensa que las llantas no tienen contacto con los granos de cacao, los que estarán en un contenedor hecho de material que no contamine los granos de cacao. A partir del boceto se genera el plano con la métrica correspondiente (fig. 15), así como el listado de componentes

donde se detallan las características de los mismos (tab. 3). El volumen total del modelo 350 L, considerando relación Materia prima / Volumen Total = 1/3 se obtiene un volumen de materia prima de 116.6 L.

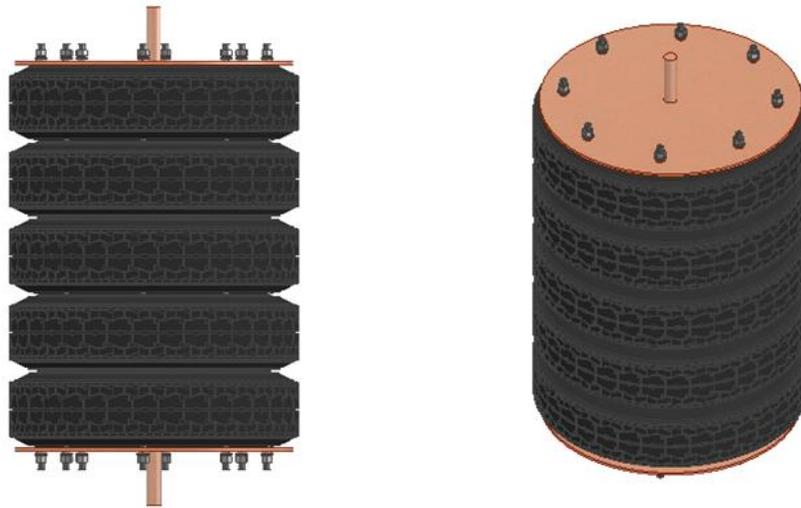


Figura 14. Modelo 1 del prototipo  
Fuente: Elaboración propia.

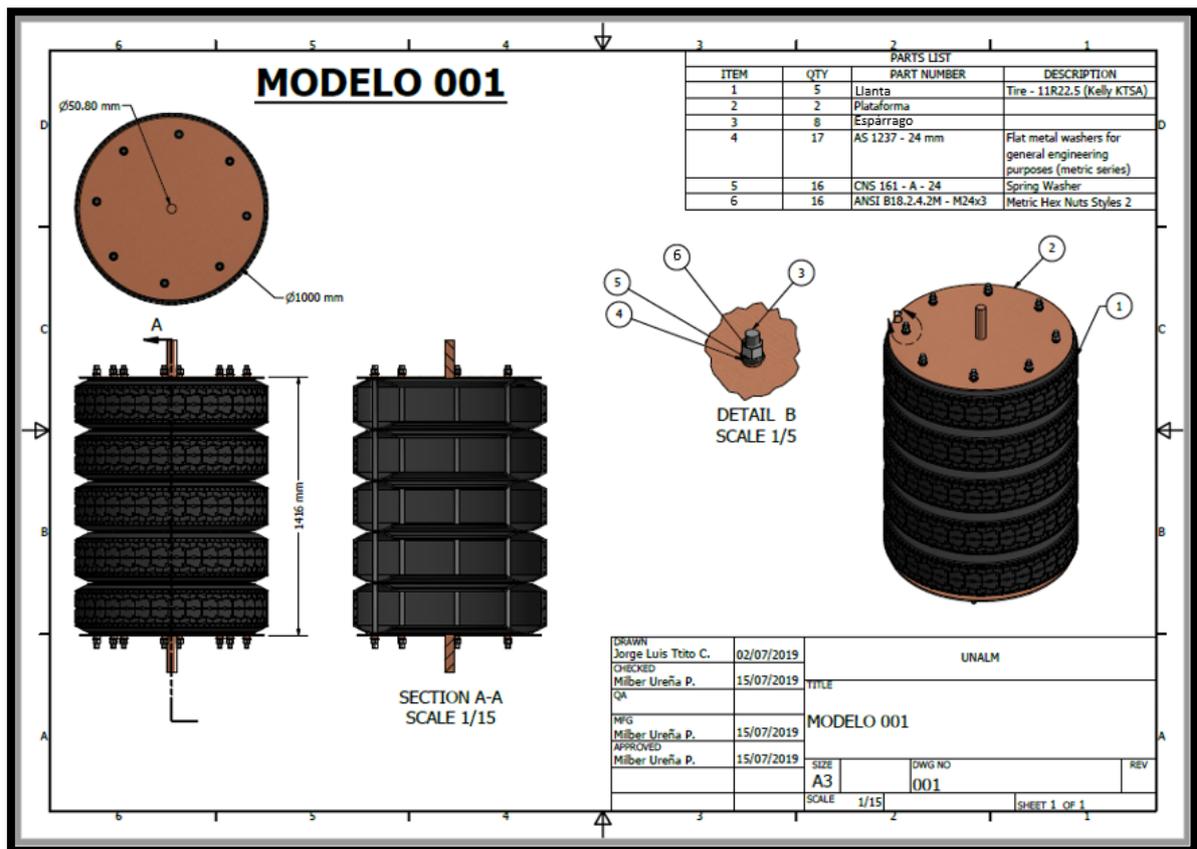


Figura 15. Plano del modelo 1 del prototipo  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Lista de partes del modelo 1.

LISTA DE PARTES			
ITEM	CANTIDAD	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
1	5	Llanta	Llanta como aislante térmico para apoyar el proceso de fermentación.
2	2	Plataforma	Tapas de madera en la base superior e inferior.
3	8	Espárrago	Barra con hilos para roscado, cumple la función de presión sobre la llanta.
4	16	AS 1337 -24 mm	Arandelas planas de metal para fines de ingeniería general (serie métrica)
5	16	CNS 161 -A-24	Arandela de resorte o de presión.
6	16	ANSI B18.2.4.2M - M24X3	Tuercas hexagonales métricas -Estilos 2

Fuente: Elaboración propia.

En el segundo modelo (fig. 16) se tiene un bastidor como estructura de soporte del conjunto de neumáticos o llantas que a su vez cumple la función de aislar térmicamente el proceso de fermentación de cacao; estructura que a su vez soporta el mecanismo de rotación del conjunto de llantas conformado por un tubo como eje longitudinal unido a una manivela. A partir del boceto se genera el plano con la métrica correspondiente (fig. 17), así como el listado de componentes donde se detallan las características de los mismos (tab. 4). El volumen total del modelo 350 L, considerando relación Materia prima / Volumen Total = 1/3 se obtiene un volumen de materia prima de 116.6 L.

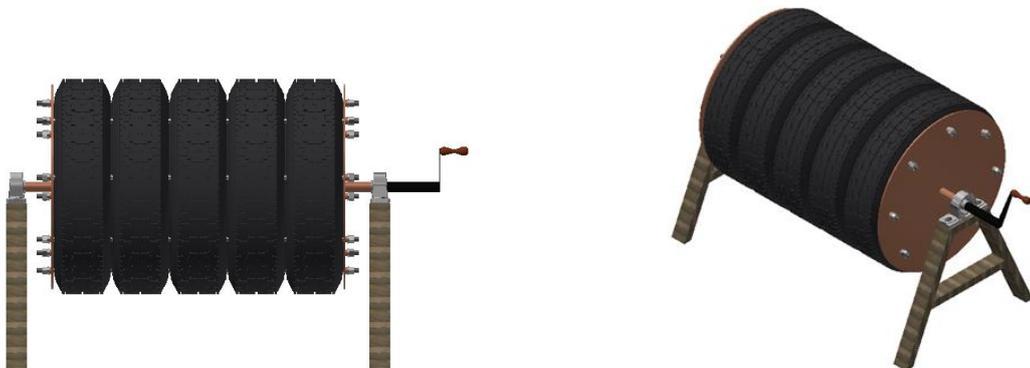


Figura 16. Modelo 2 del prototipo

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Lista de partes del modelo 2.

LISTA DE PARTES			
ITEM	CANTIDAD	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
1	1	Estructura	Soporte de madera
2	2	Chumacera	Pieza 2"
3.1	5	Llanta	Llanta como aislante térmico para apoyar el proceso de fermentación.
3.2	2	Plataforma	Tapas de madera en la base superior e inferior.
3.3	8	Espárrago	Barra con hilos para roscado, cumple la función de presión sobre la llanta.
3.4	16	AS 1337 -24 mm	Arandelas planas de metal para fines de ingeniería general (serie métrica)
3.5	16	CNS 161 -A-24	Arandela de resorte o de presión.
3.6	16	ANSI B18.2.4.2M - M24X3	Tuercas hexagonales métricas -Estilos 2
4	1	Manivela	Pieza madera

Fuente: Elaboración propia.

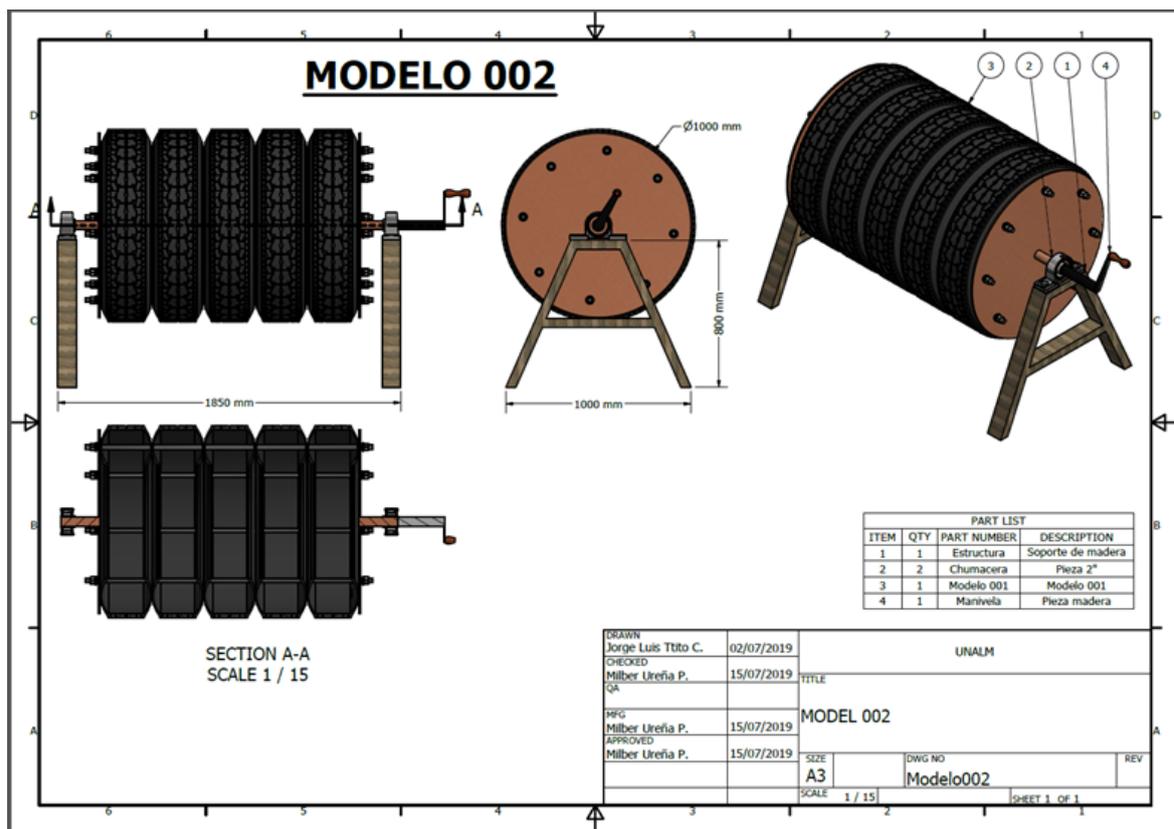


Figura 17. Plano del modelo 2 del prototipo  
Fuente: Elaboración propia.

En el tercer modelo (fig. 18) se tiene un anaquel como estructura de soporte del conjunto de neumáticos o llantas que a su vez cumple la función de aislar térmicamente el proceso de fermentación de cacao; funcionalmente, se debe pensar que se trata de tres fermentadores individuales. A partir del boceto se

genera el plano con la métrica correspondiente (fig. 19), así como el listado de componentes donde se detallan las características de los mismos (tab. 5). El volumen total del modelo por llanta es de 70 L, considerando relación Materia prima / Volumen Total = 1/3 se obtiene un volumen de materia prima de 23.3 L.

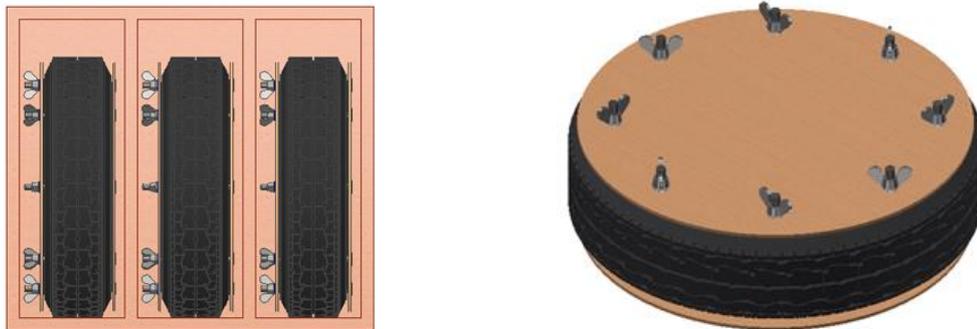


Figura 18. Modelo 3 del prototipo  
Fuente: Elaboración propia.

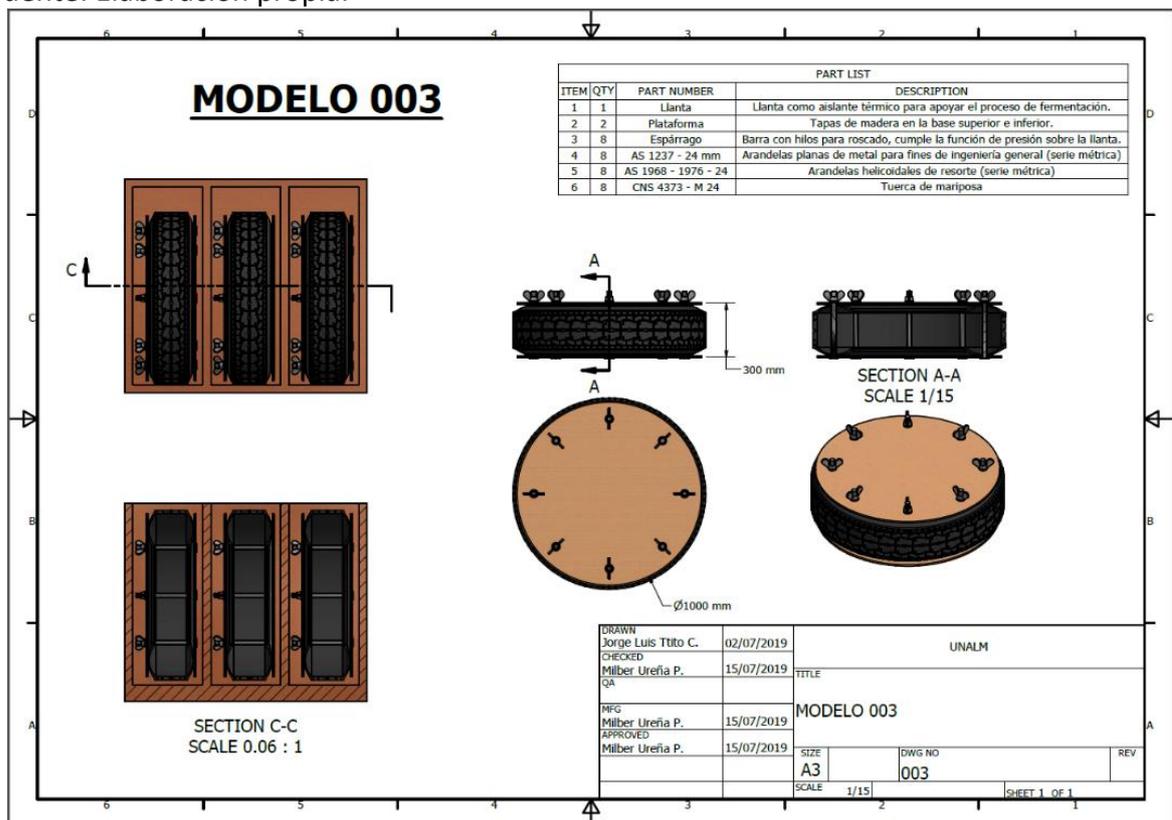


Figura 19. Plano del modelo 3 del prototipo  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Lista de partes del modelo 3.

LISTA DE PARTES			
ITEM	CANTIDAD	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
1	3	Llanta	Llanta como aislante térmico para apoyar el proceso de fermentación.
2	6	Plataforma	Tapas de madera en la base superior e inferior.
3	24	Espárrago	Barra con hilos para roscado, cumple la función de presión sobre la llanta.
4	24	AS 1237 - 24 mm	Arandelas planas de metal para fines de ingeniería general (serie métrica)
5	24	AS 1968 - 1976 - 24	Arandelas helicoidales de resorte (serie métrica)
6	24	CNS 4373 - M 24	Tuerca de mariposa
7	1	Repisa	Mueble para organizar las llantas individuales

Fuente: Elaboración propia.

En el cuarto modelo (fig. 20) se tiene un anaquel como estructura de soporte del conjunto de neumáticos o llantas que a su vez cumple la función de aislar térmicamente el proceso de fermentación de cacao; modelo que es similar funcionalmente con el modelo 2, al contar con un mecanismo de agitación de la masa de granos de cacao, pero pensando en un eje con paletas. A partir del boceto se genera el plano con la métrica correspondiente (fig. 24), así como el listado de componentes donde se detallan las características de los mismos (tab. 6). El volumen total del modelo por llanta es de 210 L, considerando relación Materia prima / Volumen Total = 1/3 se obtiene un volumen de materia prima de 70 L.

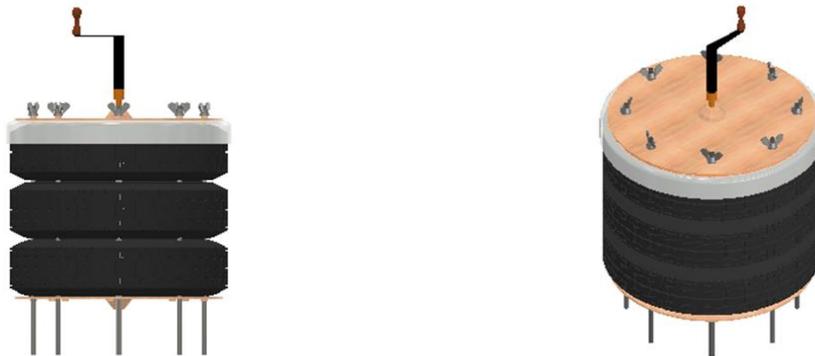


Figura 23. Modelo 4 del prototipo

Fuente: Elaboración propia.

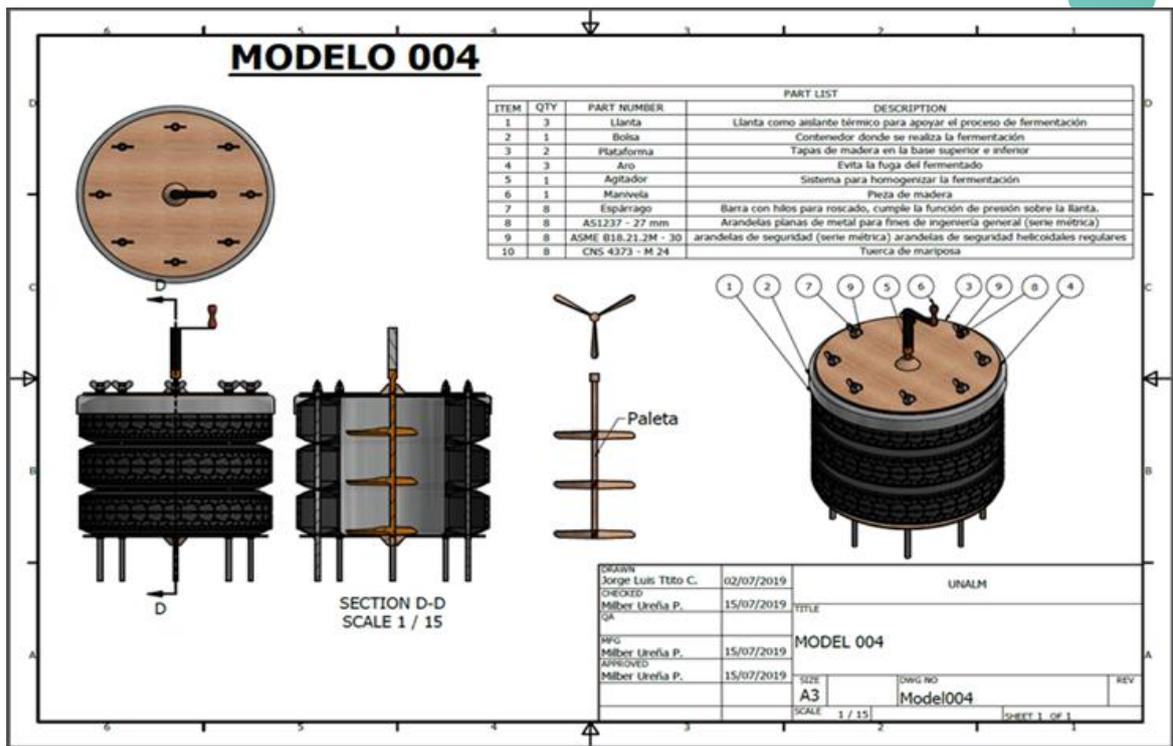


Figura 24. Plano del modelo 4 del prototipo  
 Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Lista de partes del modelo 4.

LISTA DE PARTES			
ITEM	CANTIDAD	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
1	3	Llanta	Llanta como aislante térmico para apoyar el proceso de fermentación
2	1	Bolsa	Contenedor donde se realiza la fermentación
3	2	Plataforma	Tapas de madera en la base superior e inferior
4	3	Aro	Evita la fuga del fermentado
5	1	Agitador	Sistema para homogenizar la fermentación
6	1	Manivela	Pieza de madera
7	8	Espárrago	Barra con hilos para roscado, cumple la función de presión sobre la llanta.
8	8	AS1237 - 27 mm	Arandelas planas de metal para fines de ingeniería general (serie métrica)
9	8	ASME B18.21.2M - 30	Arandelas de seguridad (serie métrica) arandelas de seguridad helicoidales regulares
10	8	CNS 4373 - M 24	Tuerca de mariposa

Fuente: Elaboración propia.

#### 4. Selección del modelo

Para la selección del modelo se elaboró una ficha técnica de comparación (tab. 7) y a partir del análisis efectuado se decidió seleccionar el modelo 4 para las pruebas preliminares en Colombia por lo siguiente:

- El uso de las llantas como componente aislante le brinda a la fermentación buena estabilidad a la hora de realizar la fermentación.
- El número de piezas es importante para realizar el manejo del volteado durante la fermentación.
- El modelo 004 es el mejor debido a las siguientes características: por el fácil manejo y por la capacidad de carga para poder realizar un monitoreo adecuado.

Tabla 7. Ficha técnica de comparación.

CONCEPTO	MODELOS			
	MODEL-001	MODEL-002	MODEL-003	MODEL-004
Capacidad de carga	116.6	116.6	23.3	70
Número de componentes	63	67	35	43
Volumen de trabajo	Alto	Alto	Bajo	Intermedio
Metodología de manejo	Volcado manual	Volcado manual con ayuda de plataforma	Volteado manual	Sistema de agitación
Facilidad de manejo	Complicado	Sencillo	Sencillo	Sencillo
Complejidad de armado	Alto	Alto	Bajo	Intermedio

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 22 se presenta el modelo 4 construido en Colombia, en el cual se realizaron dos ensayos a escala con o sin adición de inóculo. La capacidad del equipo es de 60 kg, presentándose dificultades en la homogeneidad de la mezcla en la base del recipiente de plástico. Sin embargo, se logró un buen control de la temperatura como se observa en la figura 23, presentándose mayor temperatura en la parte superior del equipo y menor en la parte inferior. Lamentablemente no se alcanzó la temperatura de 45°C aun después de 7 días de fermentación. Al realizar la prueba de corte (Figura 24) el porcentaje de cacao bien fermentado no fue superior al 55%. Se encuentra todavía un alto porcentaje de granos morados sin fermentar, que alteran la calidad sensorial. Al realizar la evaluación sensorial se determinó un aroma cacao fuerte, sin astringencia, pero con algunas notas verdes, definidos por los granos sin fermentar. Por lo anterior se requieren hacer mejoras tecnológicas que garanticen una mejor homogeneidad en la temperatura y ojalá un mayor aumento en la temperatura de la masa para que alcance la temperatura de muerte del embrión.



Figura 22. Modelo 4 construido en Colombia

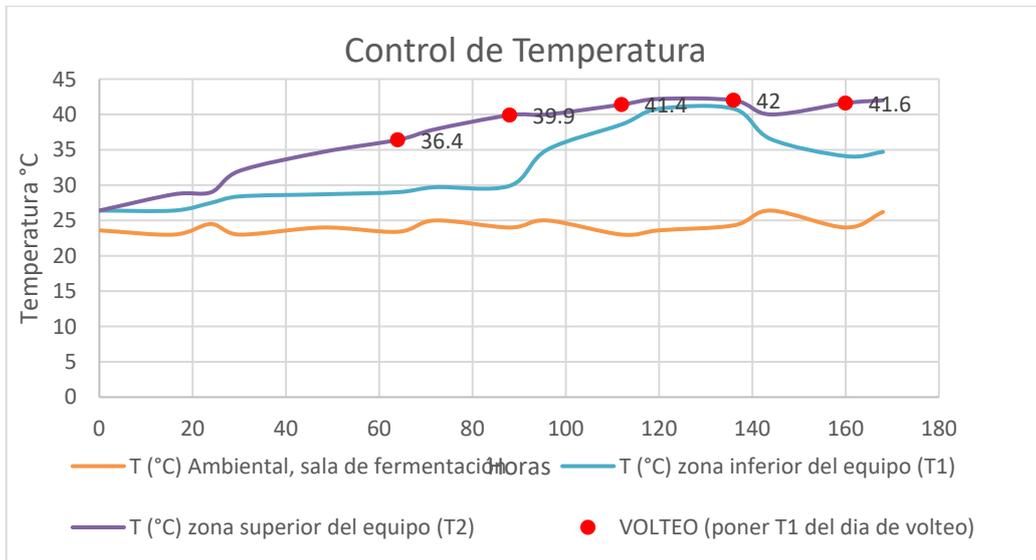


Figura 23. Registro de temperatura en modelo 4, pruebas preliminares en Colombia



Figura 24. Prueba de corte

## - Prototipo final

Posterior a las pruebas preliminares en el modelo 4 y al enfrentarlo contra el concepto del producto: *“Fermentador portátil de grano de cacao en baba, de fácil construcción, operación y mantenimiento en campo a bajo coste, con el que se obtiene granos fermentados y mucílago con calidad sensorial, higiénica y sanitaria”*, se tiene que la característica de fácil construcción y mantenimiento a bajo coste del concepto no se ve reflejado con el número de componentes y la complejidad del armado. En tal sentido, se pensó en mejorar el modelo 4, buscando levantar las referidas observaciones. Es así, que en base a un estudio de integridad estructural (anexo 1) y buscando la simplicidad en el proceso de agitación, se pensó en combinar características del modelo 1 con los del modelo 4, resultando el modelo híbrido 5 que se presenta en la figura 25.

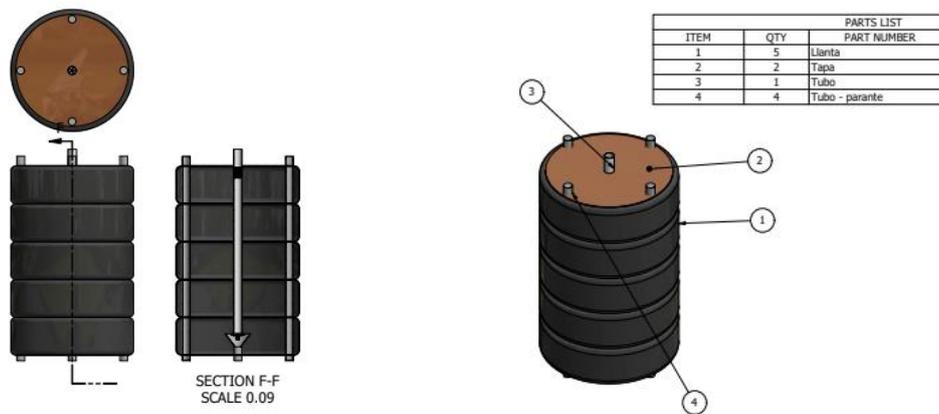


Figura 25. Modelo 5 del prototipo de fermentador de cacao.  
Fuente: Elaboración propia.

El modelo 5 es un prototipo de fermentador de cinco llantas de aro 14 unidas al estar atravesadas por cuatro tubos de agua de PVC; número de llantas definido al generar un volumen suficiente para albergar 50 kg de granos de cacao. El equipo está sometido a cargas estáticas y dinámicas (peso muerto y volcadura) que afectan su resistencia y que se generan al estar la masa de granos de cacao dentro de una bolsa tipo malla de material sintético que cuelga de los tubos y porque se espera que la remoción de la masa de granos se ejecute al echar el equipo en el suelo y rodarlo, estando la referida bolsa ya descolgada y cerrada en su abertura por un cordón.

Considerando el resultado del estudio de integridad estructural que en resumen da la seguridad que el modelo 5 puede responder a cargas estáticas y dinámicas generadas en operación, solo con riesgo de deformación de los cuatro tubos de PVC si cae desde una altura de 1.5 m con carga de 50 kg de granos de cacao, se decidió

construirlo para las pruebas de ensayo en planta piloto y en campo. Cabe mencionar que, en base al estudio, también se decidió construir primero el modelo 5 pero con tres tubos PVC, buscando la eficiencia de gasto en su construcción. En la figura 26 se presenta el modelo 5 con cuatro tubos y la bolsa de carga de la masa de granos de cacao.

A efecto de facilitar la redacción de este informe, en adelante al prototipo de fermentador portátil modelo 5 propuesto en este estudio se le denominará PFP-M5.



Figura 26. PFP-M5 con bolsa colgante contenedora de granos de cacao.

Fuente: Elaboración propia.

## 5. Fabricación del modelo seleccionado

En la tabla 8 se presenta la lista de materiales que se emplearon en la construcción del PFP-M5 con cuatro tubos. Cabe resaltar que ante la interrogante de saber qué tipo de neumáticos aro 14 serían los adecuados para el fermentador, se realizó un estudio que se presenta en el anexo 2, donde a través de la simulación de la transferencia de calor en el prototipo durante la fermentación, se obtuvo que el tipo de neumático 155/55 R14 sería el que mejor simuló una cinética de temperatura en la masa de granos de cacao.

### Procedimiento de fabricación

Considerando el cumplir con el concepto de producto con respecto a la facilidad de construcción, es que en la tabla 9 se presenta el procedimiento correspondiente. En la figura 27 se presenta el primer prototipo en construcción, en la figura 28 la bolsa contenedora de granos de cacao, en la figura 29 el refuerzo en la malla mosquitera para la abertura por donde pasará el tubo de PVC y en la figura 27 la tapa superior del primer prototipo experimental hecho con cucho con lona de  $\frac{1}{4}$  de pulgada de espesor, que soporta la válvula check hecha con un reductor de 2 a 1  $\frac{1}{2}$  pulgadas que lleva una tapa de plástico delgada que descansa sobre el borde de la estrangulación, para que actúe levantándose al aumento de presión dentro del

fermentador. Sobre la tapa se ven los sensores inalámbricos de temperatura Datatrace Temp de la Ball Instrument®.



Figura 27. Primer prototipo en construcción.



Figura 28. Bolsa contenedora de granos de cacao hecha con malla RASCHEL.



Figura 29. Refuerzo en la malla mosquitera para abertura por donde pasará el tubo PVC.



Figura 30. Tapa de caucho con lona que soporta la válvula check en su centro. Vista de sensores de temperatura.

En la tabla 10 se presenta el armado del PFP-M5, con cuatro tubos de PVC, en ocho videos cortos. Cabe mencionar que los videos están en condición de PRIVADO, por lo que para su visualización se tiene que solicitar la autorización a la Dra. Angélica Sandoval (apsandovala@ut.edu.co) o Dr. Milber Ureña (moup@lamolina.edu.pe).

Tabla 8. Lista de materiales y coste para la construcción del PFP-M5.

Ítem	Nombre	Valor unidad (S/)	Cantidad	Valor total (S/)
1	Neumático desgastado (aro 14) 155/65 R14	10*	4	40
2	Tubo para agua con rosca de 1' (2.54 cm/1 in) - PVC Clase 10 NTP 399.166 : 2008 Revisada: 2018	40	1	40
3	Tapón hembra con rosca interna 1' (2.54 cm/1 in) - PVC NTP 399.002 : 2015	4	8	32
4	Tapón hembra sanitaria (desagüe) 2'' (5.08 cm/2 in) - PVC NTP 399.003 : 2015	3	1	3
5	Reducción sanitaria (desagüe) de 2' a 1 ½' - PVC NTP 399.003 : 2015	4	1	4
6	Unión con rosca interna 1' - PVC NTP 399.166 : 2018	3	4	12
7	Niple con rosca 1' - PVC NTP 399.166 : 2018	3	4	12
8	Arandela (junta) de jebe 25.4 mm de diámetro interno x 20 de ancho x 5 mm de espesor	5	8	40
9	Arandela (junta) de jebe 45 mm de diámetro interno x 20 de ancho x 5 mm de espesor	8	1	8
10	Corte de plancha de ALUZINC de 500 x 500 x 0.6 mm	30	3	90
11	Corte de malla RASCHEL 80% color blanco (4200 mm de ancho) 1470 x 1000 mm	10	1	10
12	Corte de tela LONA SANFORIZADA (marca Hilo rojo) 6039 PPT (1550 mm de ancho) 4300 x 50 mm	5	1	5
13	Corte de malla mosquitera 700 x 700 mm	2	1	2
14	Bolsa de polietileno alta densidad transparente 5 micras de 80 x 120 cm	5	2	10
			Inversión total:	308

\*Comprado en depósito de llantas usadas en Lima.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Procedimiento de construcción del PFP-M5.

**Pasos a seguir...**

- 1 Cortar el tubo de PVC 1' (5 m) para obtener 4 tubos de 1 m de longitud.
- 2 Generar hilos de enrosque en los extremos de cada uno de los cuatro tubos para las tapas roscadas con uso de TARRAJA para tubo de PVC.
- 3 Colocar arandela (junta) de jebe y tapa en uno de los extremos del tubo de PVC; hacerlo en los 4 tubos.  
Hacer en el perfil de cada uno de los cuatro neumáticos aro 14, cuatro orificios equidistantes cuyo centro de cada uno coincida con el vértice de un cuadrado de 33 cm de lado. Hacer el corte con una broca copa para metal HSS 35 mm – 1 y 3/8'' acoplado a un taladro eléctrico de mano.
- 4
- 5 Desgastar los orificios para lograr atravesar los tubos de agua de PVC con extremos enroscados.  
Dibujar un círculo de 50 cm de diámetro sobre la plancha de ALUZINC de 500 x 500 x 0.6 mm y cortar, con alicate de corte de alambre, para obtener un disco de 50 cm de diámetro. Hacerlo también con la otra plancha de ALUZINC.
- 6
- 7 Hacer en el disco de ALUZINC de 50 cm de diámetro, cuatro orificios equidistantes cuyo centro de cada uno coincida con el vértice de un cuadrado de 33 cm de lado. Hacer el corte con una broca copa para metal HSS 35 mm - 1 y 3/8'' acoplado a un taladro eléctrico de mano. Hacerlo también en el otro disco de ALUZINC al cual se le hará otro orificio en su centro de 4.5 cm de diámetro, ya que al ser la tapa superior del fermentador, en él se insertará la válvula check prefabricada de PVC.  
Dibujar una corona circular de 50 cm de diámetro externo y 40 cm de diámetro interno sobre la plancha de ALUZINC de 500 x 500 x 0.6 mm y cortar, con alicate de corte de alambre, para obtener la referida corona. Hacer en la corona, cuatro orificios equidistantes cuyo centro de cada uno coincida con el vértice de un cuadrado de 33 cm de lado. Hacer el corte con una broca copa para metal HSS 35 mm – 1 y 3/8'' acoplado a un taladro eléctrico de mano.
- 8
- 9 Atravesar, por las perforaciones de uno de los discos de ALUZINC, los 4 tubos de PVC con tapas en uno de sus extremos. Asegurarse que los extremos con tapa rosca de los 4 tubos estén en contacto con el suelo para que cumplan la función de soporte "patas" del referido disco. Recordar que este disco es la tapa inferior del fermentador, por lo que debe estar bien asegurada al neumático por ajuste con las 4 tapas con rosca de PVC.
- 10 Apilar sobre el disco de ALUZINC los cinco neumáticos aro 14 haciendo que los 4 tubos de PVC atraviesen los orificios desgastados de cada uno de los neumáticos.
- 11 Introducir en la pila de neumáticos una de las dos bolsas de polietileno de alta densidad (5 micras) y colgarla en los tubos de PVC perforándola con cada uno de ellos. Recordar que la bolsa es reutilizable después de lavarla correctamente.
- 12 Introducir en la pila de neumáticos la segunda bolsa de polietileno de alta densidad (5 micras) y colgarla en los tubos de PVC perforándola con cada uno de ellos. Recordar que la bolsa es reutilizable después de lavarla correctamente.
- 13 Introducir en la pila de neumáticos la bolsa hecha con malla RASCHEL y colgarla en los tubos de PVC, atravesando estos las perforaciones que tiene la bolsa. Recordar que la bolsa es reutilizable después de lavarla correctamente.
- 14 Atravesar, por las perforaciones del segundo disco de ALUZINC, los 4 tubos de PVC. Recordar que este disco es la tapa superior del fermentador, por lo que debe estar

- bien asegurada al neumático por ajuste con las 4 tapas con rosca de PVC, y sus arandelas correspondientes, cuando entre en operación el fermentador.
- 15 Insertar la válvula check prefabricada de PVC con su arandela de jebe correspondiente en la perforación central de la tapa para finalizar la construcción del prototipo de fermentador portátil modelo 5 para la etapa anaeróbica (48 primeras horas de la fermentación).
- 16 Para la etapa aeróbica, se retira la tapa circular de ALUZINC y se coloca el corte de malla mosquitera en los tubos de PVC perforándola con cada uno de ellos. Seguidamente, se coloca la corona circular seguida de las uniones con las que se ajusta la corona contra el neumático haciendo presión sobre la malla mosquitera. Luego, se colocan los nipples en cada uno de los tubos seguido de la colocación de la tapa de ALUZINC. Se ponen las arandelas de jebe y finalmente las tapas de PVC.
- Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Procedimiento de armado del PFP-M5.

Video	Enlace...	Video	Enlace...
01	<a href="https://youtu.be/QzOFL1KmzQ8">https://youtu.be/QzOFL1KmzQ8</a>	05	<a href="https://youtu.be/Un2Ba40YZbE">https://youtu.be/Un2Ba40YZbE</a>
02	<a href="https://youtu.be/iVP8C6kDLMk">https://youtu.be/iVP8C6kDLMk</a>	06	<a href="https://youtu.be/ZmMDPmRnIYU">https://youtu.be/ZmMDPmRnIYU</a>
03	<a href="https://youtu.be/W-At6eZ2WGM">https://youtu.be/W-At6eZ2WGM</a>	07	<a href="https://youtu.be/-TugVsCRL2k">https://youtu.be/-TugVsCRL2k</a>
04	<a href="https://youtu.be/xJQ9qE7QFkQ">https://youtu.be/xJQ9qE7QFkQ</a>	08	<a href="https://youtu.be/FDQBByRYFWII">https://youtu.be/FDQBByRYFWII</a>

Fuente: Elaboración propia.

## 6. Pruebas de ensayo

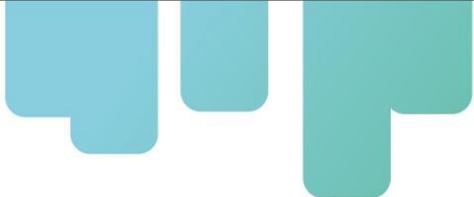
Las pruebas de ensayo se realizaron en dos etapas: Operatividad del prototipo bajo condiciones controladas del ambiente y Operatividad del prototipo en campo.

### Operatividad del prototipo bajo condiciones controladas del ambiente

En la tabla 11, se presentan los datos de temperatura de la masa de granos de cacao CCN 51 obtenidos en el primer prototipo construido de tres tubos PFP-M5. Fueron las pruebas preliminares donde se buscó conocer la respuesta del mismo operativamente, teniendo dicho comportamiento expresado en la cinética térmica de la masa de granos. Como se puede observar, la temperatura crece con el tiempo, llegando a tener la tendencia a mostrar el descenso de la misma a partir de las 96 horas, que es lo que se espera en un proceso fermentativo.

Tabla 11. Comportamiento térmico de granos de cacao CCN 51 en el PFP-M5.

Tiempo (h)	Temperatura (°C)		
	R1	R2	R3
0	28.4	27.9	28.1
24	33.2	32.2	32.3
48	35.9	36.1	36.2
72	41.2	40.6	40.2
96	42.8	43.2	43.4
120	44.8	44.3	45.3
144	43.7	43.5	43.5



Si se compara el comportamiento térmico de la masa de granos de cacao CCN 51 en el PFP-M5 durante seis días de operación (tabla 11) con lo reportado por Aka et al, (2018), no considerando las diferencias de las condiciones del entorno y el genotipo (Trinitario, Forastero y Criollo), se puede observar que en el fermentador propuesto por Aka et. al (2018) se alcanzó más rápidamente la máxima temperatura del fermento (51°C en 73 h) y que el PFP-M5 en esta investigación (44.8 °C en 120 h) se aproximó al de la caja (48°C en 118 h); sin embargo, Aka et al., (2018) reportan que la caja tuvo un volumen de 0.55 m<sup>3</sup> con una capacidad de 150 kg, lo que en volumen es cinco veces más que la del PFP-M5 (0.55/0.1 m<sup>3</sup>), por lo que, en capacidad y comportamiento térmico inducido por el diseño, el PFP-M5 es cinco veces más eficiente que la caja.

El fermentador experimental de Aka et al., (2018) es cilíndrico, con 28 cm de radio de sección transversal circular y capacidad de 150 kg de cacao en grano fresco y que la altura del cilindro (1,44 m) permite ocupar la mitad del fermentador cuando está en posición vertical durante las fases de fermentación alcohólica y acética. Si se compara estas dimensiones del cilindro y su capacidad con la del PFP-M5 (18 cm de radio, 1 m de largo y 50 kg de capacidad), se observa que hay coincidencia en cuanto a la proporcionalidad de las dimensiones, ya que resulta que el volumen del cilindro de Aka et. al (2018) es aproximadamente tres veces la del PFP-M5 (0.35/0.1 m<sup>3</sup>) y en capacidad de trabajo igual (150/50 kg).

En cuanto al diseño, se puede observar que el fermentador propuesto por Aka et. al (2018) tiene similitudes con el PFP-M5, ambos generan la remoción de los granos de cacao por volteo, tienen un material como aislante térmico distinto a la madera, el publicado tiene madera y fibra de coco el PFP-M5 tiene la mezcla de caucho y plástico (Root, 2019) en el neumático. Tienen una malla para la ventilación del contenido en la etapa aeróbica. Se puede retirar el mucílago del equipo.

En cuanto a las diferencias, se tiene que en el fermentador publicado existe un mecanismo para el volteo lo que en el PFP-M5 no lo hay, pues el volteo es manual al echar a rodar los neumáticos. El PFP-M5 es un equipo portátil “todo terreno”, que puede transitar por cualquier tipo de suelo agrícola o urbano. Otra diferencia es que en el fermentador publicado el mucílago debe ser colectado fuera del equipo, en el PFP-M5 se conserva dentro y en buenas condiciones higiénicas y sanitarias hasta ser retirado en la bolsa colectora reduciendo la posible contaminación en su transporte. En cuanto a la construcción y mantenimiento, el PFP-M5 presenta una mayor facilidad en ambos procesos y, sobre todo, a menos coste.

El fermentador experimental de Castillo (2019) es cilíndrico, con 0.3 m de radio de sección transversal circular, 1 m de largo y con capacidad de 81 kg de cacao en grano fresco. Si se compara estas dimensiones del cilindro y su capacidad con la del PFP-M5 (18 cm de radio, 1 m de largo y 50 kg de capacidad), se observa que hay coincidencia en cuanto a la proporcionalidad de las dimensiones, ya que resulta que el volumen del cilindro de Castillo (2019) es aproximadamente tres veces la del PFP-M5 (0.28/0.1 m<sup>3</sup>) y en capacidad de trabajo el doble (81/50 kg). En cuanto a la

construcción y mantenimiento, el PFP-M5 presenta una mayor facilidad en ambos procesos y, sobre todo, a menos coste. Otra diferencia es que el PFP-M5 es un equipo portátil “todo terreno”, que puede transitar por cualquier tipo de suelo agrícola o urbano.

### Operatividad del prototipo en campo

En la tabla 12, se presentan los datos de temperatura de la masa de granos de cacao Chuncho del Cusco obtenidos en el PFP-M5 de tres y cuatro tubos, con los que se buscó conocer la respuesta de los prototipos operativamente en condiciones de campo (fig. 31 y 32), teniendo dicho comportamiento expresado en la cinética térmica de la masa de granos. La comparación estadística entre los prototipos PFP-M5-4 y las cajas de fermentación, aplicando el Diseño Completo al Azar, da como resultado que no existen diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las temperaturas alcanzadas a las 72 y 96 horas. No se compararon las temperaturas del PFP-M5-3 con los demás tratamientos al no tener una réplica más debido a que se tuvo un solo equipo de tres tubos. En las figuras 31 y 32 se presentan escenas del proceso de fermentación en campo. La temperatura del ambiente en la zona estuvo en el rango de 17 a 30 °C, con una temperatura promedio predominante de 21 °C.

Alegría (2019) reportó 43 °C para los granos de Chuncho a las 72 horas de fermentación en cada uno de tres prototipos de fermentadores, caja clásica de madera cuadrada, prototipo cilíndrico de plástico de grado alimentario y prototipo clásico de gaveta de madera tipo ROHAN y para 96 horas 46.3, 48.66 y 48.33 °C, respectivamente; temperaturas más cercanas a las obtenidas en las cajas fermentadoras (tabla 13).

Tabla 12. Comportamiento térmico en campo, índice de fermentación (IF) e índice de grano de cacao Chuncho en grano en la fermentado en los PFP-M5 y caja fermentadora.

Tiempo (h)	TEMPERATURA (°C)				
	PFP-M5-3	PFP-M5-4	PFP-M5-4	Caja 1	Caja 2
0	24.4	24.4	24.4	24.4	24.4
24	28.3	26.6	29.3	35.9	34.5
48	27.4	26.3	28.4	37	34.7
72	26.3	41.2	28	39.1	45.5
96	24.5	33.3	27.2	43.4	48.3
120	33	33	33	43.3	48.4
144	34.3	33	30	44.9	48.1
IF (%)	48	62	56	98	42
IG (g/grano)	1.01	0.93	0.98	1.0	0.93

Fuente: Elaboración propia.

Schubert et. al (2021) indican que, en el proceso fermentativo del Chuncho, se debe cuidar que la temperatura en cajones en la etapa de aerobiosis no sea mayor a 50 °C para que no se cocine el grano, ni menor de 40° C porque los granos se quedarán violeta debido a que no se habrán fermentado. Los valores de índice de fermentación alcanzados (tabla 13) en los dos equipos PFP-M5-4 (62 y 56 %) son menores al de la caja 1 (98 %) pero mayores al de la caja 2 (42 %) y próximo al del PFP-M5-3 (48 %). En cuanto al índice de grano se tiene que se ha ensayado con un material con iguales características físicas.

Alegría (2019) reportó valores de índice de fermentación de 55, 84 y 79 % °C para los granos de Chuncho en caja clásica de madera cuadrada, prototipo cilíndrico de plástico de grado alimentario y prototipo clásico de gaveta de madera tipo ROHAN, respectivamente. Comparando el valor obtenido para la caja cuadrada (55 %) a las 96 horas con los valores obtenidos en los equipos PFP-M5-4 después de 144 horas de fermentación (62 y 56 %) resulta más lento el proceso que ocurre en el PFP-M5-4, igual podría decirse en el caso del PFP-M5-3 (48 %). Cabe mencionar, que a los agricultores de la Asociación de productores agropecuarios Valle de Echarati, les llamó mucho la atención que se produjera un proceso lento de fermentación del Chuncho, ya que por lo general este varietal logra el grado de fermentación adecuado en cinco días, así como que el grano preservó características de conservación buenas a los seis días de estar fuera de la mazorca. Tales apreciaciones coinciden con lo publicado por Schubert et. al (2021), donde precisan que el cacao Chuncho termina su fermentación a los cinco días y que el grado de fermentación a alcanzarse es de 60 a 75%, con el que tiene un buen nivel de fermentación.

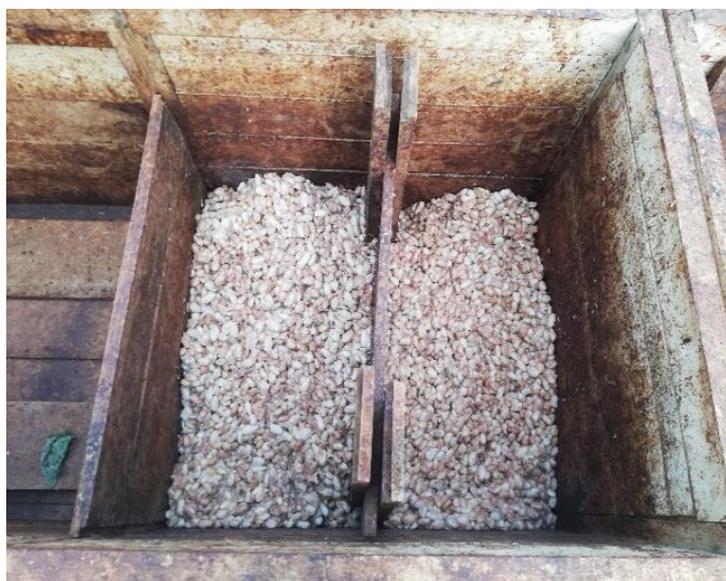


Figura 31. Cajas fermentadoras con Chuncho.

Fuente: Elaboración propia.



Los tres prototipos operativos listos



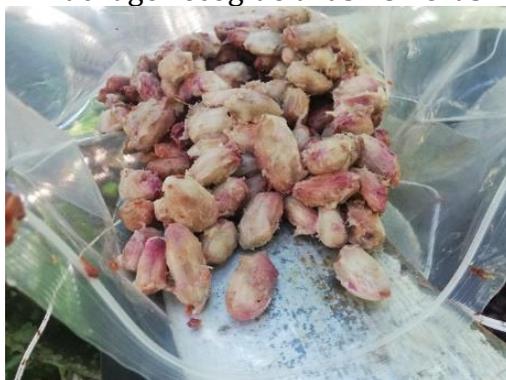
El técnico Jhonny Huaylla listo para abrir el PFP-M5-4



Fase anaeróbica terminada



Mucilago recogido a las 48 horas



Aspecto de la masa de granos al séptimo día de fermentación

Figura 32. Escenas del PFP-M5-4 en operación.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 13, se presentan los valores por duplicado de pH, índice de acidez, capacidad antioxidante, polifenoles, cafeína y teobromina determinados para los granos de cacao Chunchu fermentados en PFP-M5-4, PFP-M5-3 y dos cajas de madera.

Tabla 13. Valores de pH, índice de acidez, capacidad antioxidante, polifenoles, cafeína y teobromina de granos de cacao Chunchu fermentado en los PFP-M5 y Caja Fermentadora.

Análisis	Fermentador				
	PFP-M5-4	PFP-M5-4	PFP-M5-3	Caja	Caja
pH 1	4.51	4.80	4.51	5.11	4.50
pH 2	4.51	4.76	4.51	5.12	4.50
Índice de acidez 1	1.36	1.14	0.35	1.04	1.77
Índice de acidez 2	1.36	1.14	0.35	1.04	1.77
Capacidad antioxidante 1	484444.9	535090.9	460445.3	495237.7	689778.03
Capacidad antioxidante 2	484253.5	534208.3	461785.7	495197.8	688917.07
Polifenoles 1	463.76	501.37	455.95	437.66	660.35
Polifenoles 2	463.76	502.37	458.95	437.66	662.35
Cafeína 1	0.17	0.19	0.16	0.27	0.25
Cafeína 2	0.17	0.19	0.17	0.28	0.27
Teobromina 1	0.50	0.57	0.44	0.48	0.44
Teobromina 2	0.47	0.51	0.42	0.48	0.48

Índice de acidez (g/10 g de muestra original)

Capacidad antioxidante (exp. en micromol de Trolox Equival/100 g de muestra)

Polifenoles (mg/100 g de muestra original; exp. en mg de Ácido Gálico Equival/100 g de muestra)

Cafeína (g/10 g de muestra original)

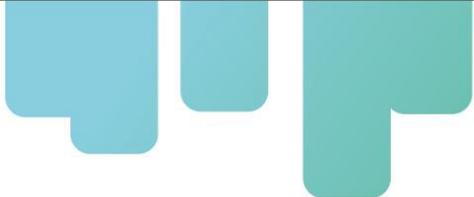
Teobromina (g/10 g de muestra original)

Fuente: Elaboración propia

La comparación estadística aplicando el Diseño Completo al Azar (DCA) entre los valores de pH, índice de acidez, capacidad antioxidante, polifenoles, cafeína y teobromina en granos de cacao Chunchu fermentados en el prototipo PFP-M5-4 y las caja de fermentación (tabla 13), da como resultado que no existe diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) en pH, índice de acidez, capacidad antioxidante, polifenoles y teobromina entre los granos de cacao de ambos tipos de fermentadores, existiendo sí diferencia en cuanto a cafeína. Los valores correspondientes al PFP-M5-3 no fueron considerados en el DCA por no tener repetición.

Alegría (2019) reportó valores de pH de 4.89, 4.9 y 4.87 para los granos de Chunchu fermentados en caja clásica de madera cuadrada, prototipo cilíndrico de plástico de grado alimentario y prototipo clásico de gaveta de madera tipo ROHAN, respectivamente. Comparando estos valores alcanzados a las 96 horas con los valores promedio obtenidos en los equipos PFP-M5-4 después de 144 horas de fermentación (4.51 y 4.78) fortalece la idea que en el PFP-M5-4 la fermentación resulta más lenta, igual podría decirse en el caso del PFP-M5-3 (4.51).

Alegría (2019) reportó valores de Índice de acidez de 0.63, 0.67 y 0.67 para los

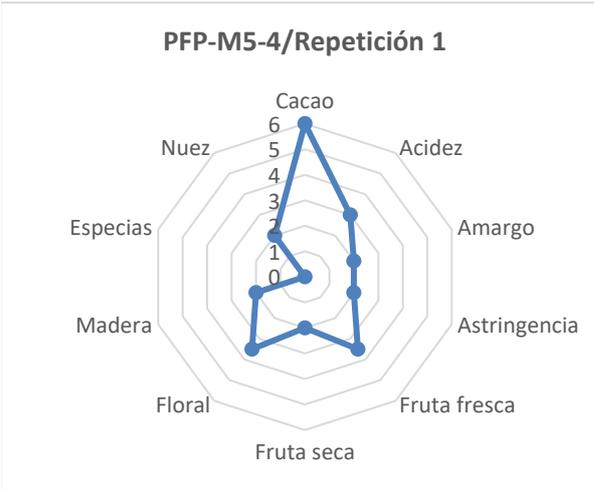


granos de Chuncho fermentados en caja clásica de madera cuadrada, prototipo cilíndrico de plástico de grado alimentario y prototipo clásico de gaveta de madera tipo ROHAN, respectivamente. Comparando estos valores alcanzados a las 96 horas con los valores promedio obtenidos en los equipos PFP-M5-4 después de 144 horas de fermentación (1.36 y 1.14) se observa que son aproximadamente un 50% menores. Lo alcanzado en el caso del PFP-M5-3 (0.35) resulta menor a lo reportado por Alegría (2019) debido a que no se llegó a una buena fermentación de 60 a 75 % (Schubert et al., 2021).

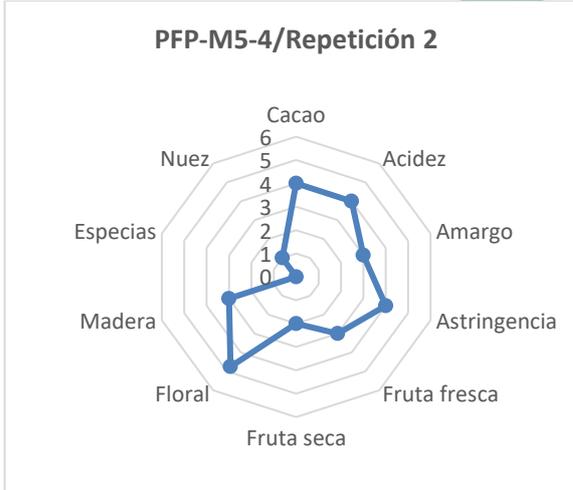
Sobre lo observado con respecto al comportamiento térmico de los prototipos ensayados PFP-M5-4 y PFP-M5-3 (fig. 33 y 34), se puede explicar tal fenómeno debido a que los 50 kg de material a fermentar, colgados de los tubos de PVC, preformando un cilindro de 14 pulgadas (35.56 cm), protegido y aislado térmicamente del ambiente al estar dentro de la pila de neumáticos, “es como pasar el cacao de la mazorca natural a una gran mazorca tecnológica”; es por ello que se pensó que el PFP-M5-4 podría ser mejorado para convertirse en un SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE GRANOS DE CACAO RECIÉN EXTRAIDOS DE LA MAZORCA”. La idea, fue saludada y respaldada por los agricultores y personal técnico de la Asociación.

Se realizó el análisis sensorial de los granos de cacao fermentados y secos, y se obtuvieron como resultado los perfiles sensoriales con sus correspondientes comentarios que se presentan en la figura 33. Se observa que hay diferencias entre los perfiles obtenidos del mismo fermentador y entre fermentadores. Se destaca que se confirma en el caso de la caja 1 que hay una sobrefermentación que se confirma con el 98 % de índice correspondiente (tabla 12), siendo además este muy diferente a la caja 2 con 42 % de índice de fermentación. Con respecto a los productos del PFP-M5-4, hay coincidencias cercanas entre las repeticiones en cuanto al olor a cacao, las notas frutales y herbales y nota final de nuez; asimismo, con algunos atributos del PFP-M-3.

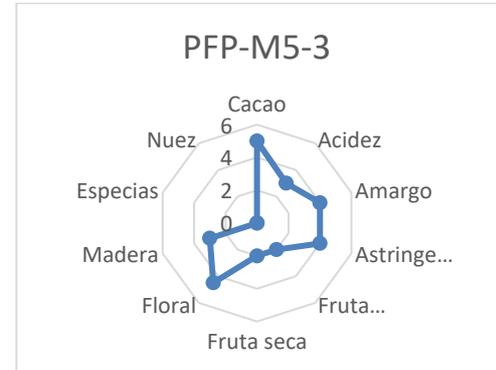
Como conclusión de esta etapa de ensayos, a partir de los resultados obtenidos en los parámetros evaluados y aspectos funcionales y de manejo del PFP-M5-4 y del PFP-M5-3, se diseñó y construyó un nuevo prototipo, el PFP-M6-3, con el que se alcanzó a evaluar el grado de fermentación y la cinética de temperatura en el interior de la masa de granos en fermentación. Asimismo, se realizó otra prueba más con el PFP-M5-4 y PFP-M5-3 (fig.34 y 35) para confirmar la lentitud del proceso de fermentación en él. A manera de validación, de la potencialidad que mostró los prototipos propuestos, se realizaron las pruebas con una mezcla de trinitarios producidos por los agricultores de la misma Asociación de Echarati.



**Comentario:**  
Olor cacao y herbal. Atributos básicos balanceados, notas frutales de baja intensidad, resaltan notas herbales y florales, final de nuez. Buena intensidad de cacao.



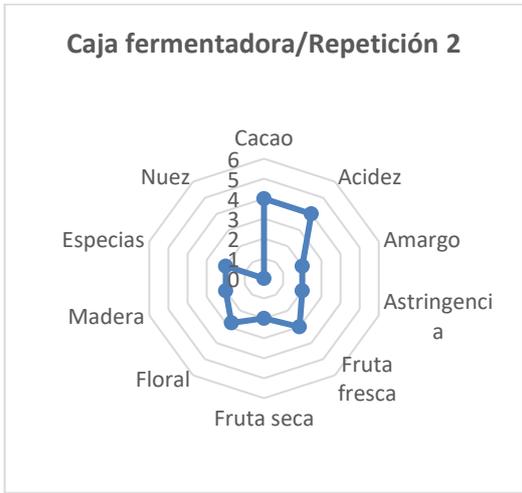
**Comentario:**  
Olor ácido y a cacao. Sabor ácido inicial, notas de frutales cítricas, notas florales intensas, notas de madera fresca y final de nuez de muy baja intensidad.



**Comentario:**  
Olor cacao. Inicio notas herbales amargo y astringente, desarrolla notas herbales que persisten al igual que la astringencia, notas de violeta. Final láctico suave.



**Comentario:**  
Olor muy baja intensidad. Pobre desarrollo de atributos, apagado, leve floral y nuez. Sobrefermentado.



**Comentario:**  
Olor cacao, acidez inicial persistente, notas de frutas cítricas, notas herbales de baja intensidad, notas de flores de azahar de baja intensidad, especias (Nuez moscada). Balanceado y suave.

Figura 33. Perfiles sensoriales de los granos de cacao fermentados y secos en los equipos PFP-M5-4, PFP-M-3 y caja fermentadora.

Fuente: Elaboración propia.

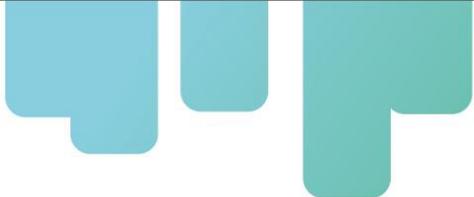


Figura 34. Validación del PFP-M5-3 con mezcla de trinitarios. Término de la fase anaeróbica.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 35. Validación del PFP-M5-3 con mezcla de trinitarios. Término de la fase aeróbica.  
Fuente: Elaboración propia.

El nuevo Prototipo de fermentador portátil de tres tubos PFP-M6-3 (fig. 36) se construyó con los siguientes cambios en el diseño:

- 1) Cuatro neumáticos aro 18 (215/45 R18).
- 2) Tres tubos de PVC
- 3) Tapas de Ethylene Vinyl Acetate (foamy, foami, goma eva, microporoso) de 200 mm de espesor.
- 4) Corte de malla RASCHEL 80% color blanco (ancho de 1700 x altura de 900 mm)
- 5) Bolsas de polietileno de alta densidad de 5 micras (ancho de 1000 x altura de 1200 mm)

Se decidió por el neumático aro 18 (215/45 R18), para dar cuatro pulgadas más de amplitud al cilindro y darle más espacio a la bolsa para que en los volteos se disgreguen los granos de cacao y se produzca una mejor aireación de los mismos. Se redujo a tres tubos de PVC en base al estudio de integridad estructural que aseguraba la resistencia del equipo a esfuerzos operativos.

La construcción del nuevo Prototipo de Fermentador Portátil de tres tubos PFP-M6-3 (fig. 36 y 37) se realizó siguiendo el procedimiento utilizado para los otros modelos; siendo más sencillo al obtenerse las tapas del nuevo material microporoso que es de fácil corte, liviano y no se corroe como el ALUMICEL. Cabe mencionar, que en el primer diseño construido de tres tubos las tapas fueron hechas de caucho con lona de  $\frac{1}{4}$  de pulgada de espesor, que luego fue sustituida por ALUMICEL porque no mantenía una rigidez adecuada; pero todavía así, en los ensayos se mantuvo como material de las tapas del PFP-M5-3.



Figura 36. Inicio de operación del PFP-M6-3 con mezcla de trinitarios.

Fuente: Elaboración propia.

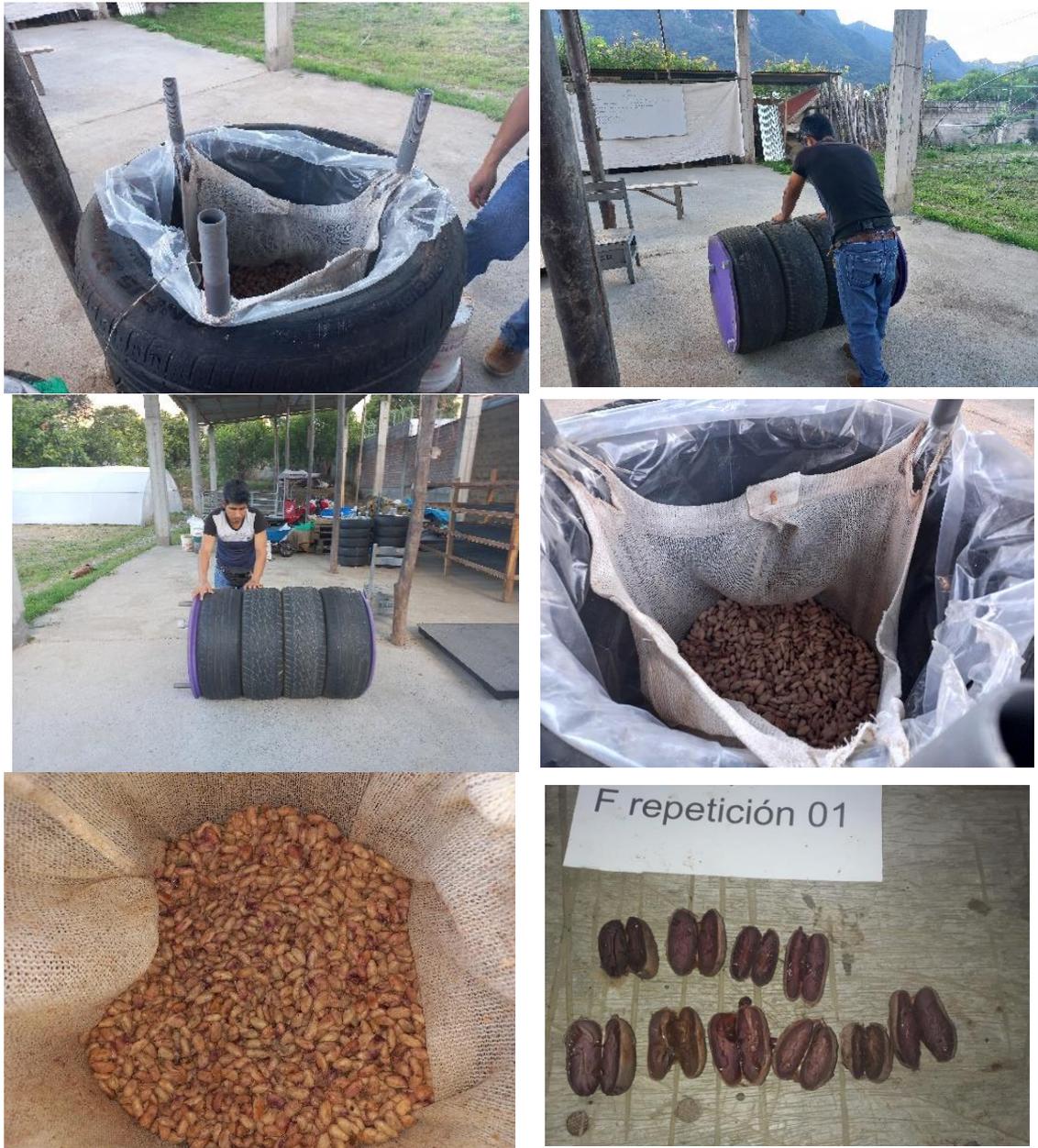


Figura 37. Término de operación del PFP-M6-3 con mezcla de trinitarios.  
Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 14, se presenta la cinética de valores de temperatura de la masa de granos de mezcla de trinitarios obtenida en el PFP-M6-3 y PFP-M5-3, con los que se valida lo antes referido sobre la potencialidad de los prototipos propuestos en esta investigación, en base a su respuesta operativa en condiciones de campo, teniendo dicho comportamiento expresado en la cinética térmica de la masa de granos y en los índices de fermentación alcanzados. Se evidencia que en el PFP-M5-3, sí se logra un proceso de fermentación de menos velocidad en comparación al PFP-M6-3 y los otros fermentadores estudiados y que al darle más espacio a la masa de cacao para el volteo reduciendo la carga de 50 a 40 kg, se vuelve un prototipo ideal para pequeños productores.

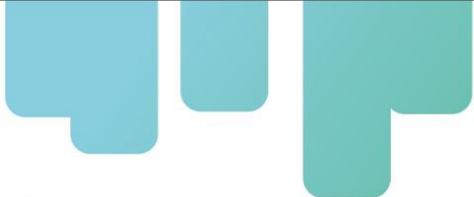


Tabla 14. Comportamiento térmico en campo e Índice de fermentación de la mezcla de trinitarios fermentados en PFP-M5-3 y PFP-M6-3.

PFP-M5-3 (40 kg de cacao)				PFP-M6-3 (50 kg de cacao)			
Tiempo (h)	Temp. (°C)	Tiempo (h)	Temp. (°C)	Tiempo (h)	Temp. (°C)	Tiempo (h)	Temp. (°C)
0	20.8	192	31.1	0	24.6	192	44.6
48	25.5	216	32	48	24.4	-	-
72	27	240	30.5	72	26.8	-	-
96	25	264	36.5	96	25	-	-
120	30.8	288	41.5	120	30.7	-	-
144	36.8	312	40	144	35.2	-	-
168	34	-	-	168	38.8	-	-
Índice de fermentación = 63 %				Índice de fermentación = 80 %			

Fuente: Elaboración propia.

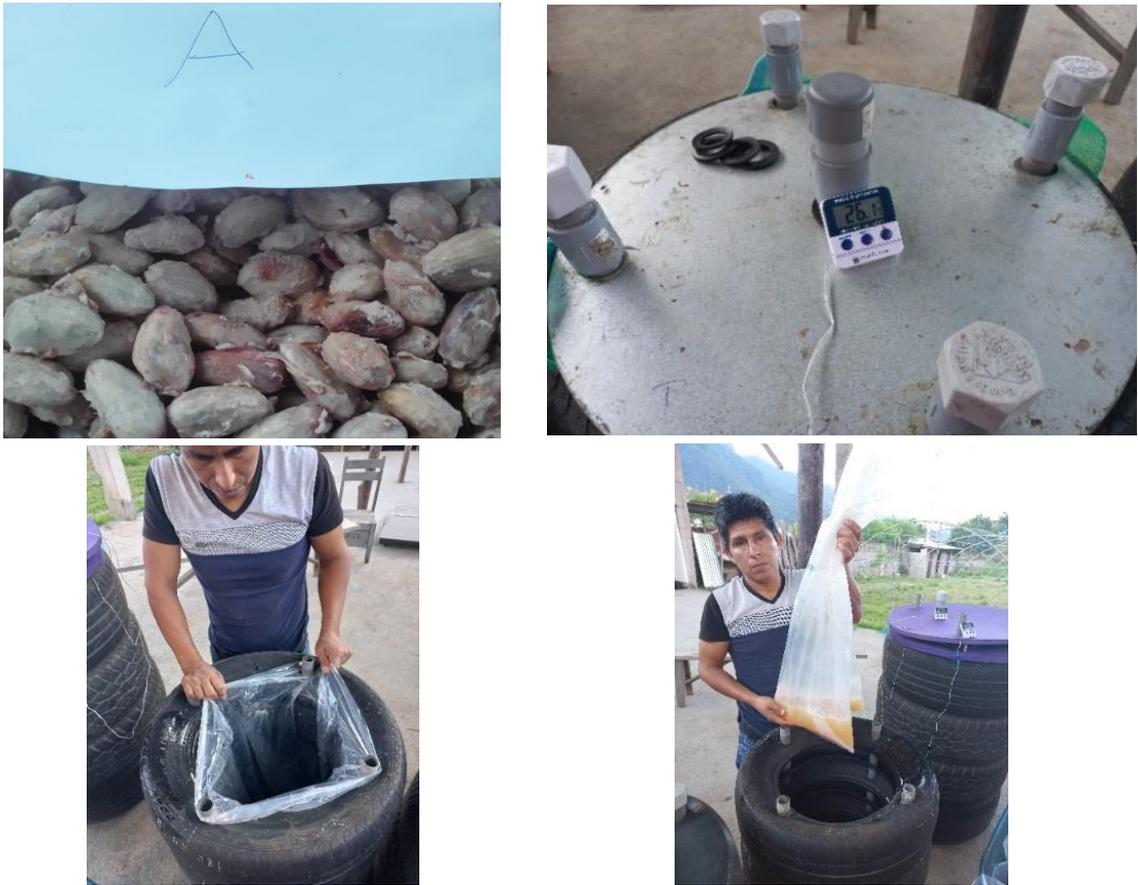


Figura 38. Validación del PFP-M5-4 con mezcla de trinitarios. Conservación de granos de cacao. Retiro de mucílago.

Fuente: Elaboración propia.

Se confirma también la potencialidad de los prototipos PFP-M5-4 y PFP-M5-3 para ser destinados a la conservación de granos de cacao, tal como se comprobó en el ensayo que se realizó en el PFP-M5-4 con mezcla de trinitarios, que a los seis días de haber sido extraídos los granos de la mazorca, tuvo una temperatura de 26.1 °C y el 30% de granos presentaron la muerte del embrión. Durante todo el proceso la apariencia de la masa de cacao tuvo buen aspecto y sin olores extraños (fig. 38 y 39).



Figura 39. Validación del PFP-M5-4 con mezcla de trinitarios. Evaluación de la conservación. Retiro del cacao. Fuente: Elaboración propia.

La cinética térmica del calentamiento de la masa de granos de mezcla de trinitarios en la fermentación dentro del PFP-M5-3 (fig. 40), se puede representar con el modelo matemático ( $r^2=79.7\%$ ):

$$\text{Temperatura} = \exp(2.99913 + 0.0364715 * \sqrt{\text{Tiempo}})$$

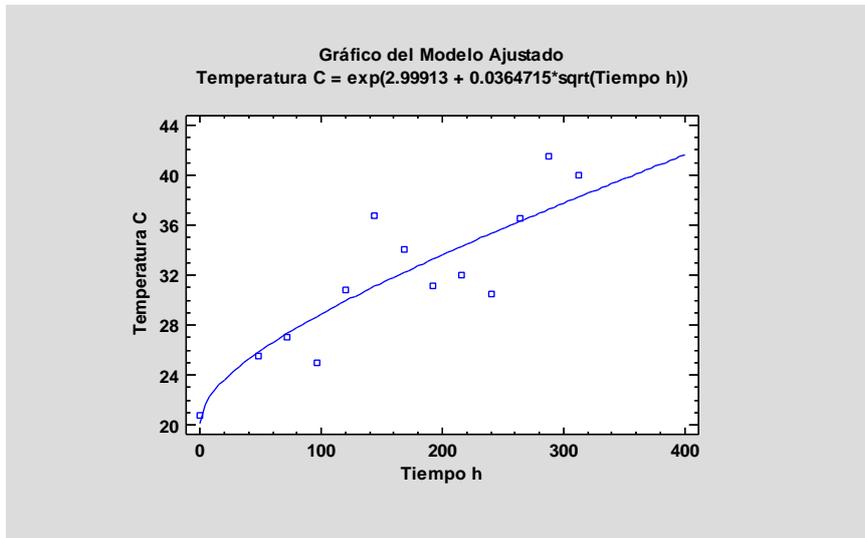


Figura 40. Cinética térmica de mezcla de trinitarios en el PFP-M5-3.

Fuente: Elaboración propia.

La cinética térmica del calentamiento de la masa de granos de mezcla de trinitarios en la fermentación dentro del PFP-M6-3 (fig. 41), se puede representar con el modelo matemático ( $r^2=96.35\%$ ):

$$\text{Temperatura} = 22.9711 + 0.000567283 * \text{Tiempo } h^2$$

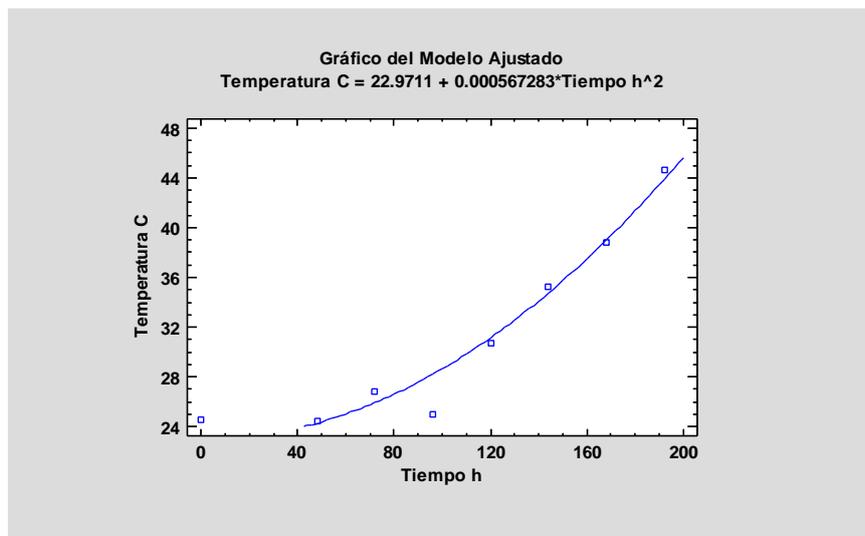


Figura 41. Cinética térmica de mezcla de trinitarios en el PFP-M6-3.

Fuente: Elaboración propia.

## 7) Diseño final

Considerando los resultados de las pruebas de ensayo, se determinó que los prototipos de fermentador a proponer, al cumplir con el concepto del producto de esta investigación son: el PFP-M6-3 para una capacidad de 50 kg y el PFP-M5-3 para menos de 40 kg. Asimismo, proponer el PFP-M5-4 como equipo de almacenamiento de granos de cacao en baba.

Cumpliendo con la mejora continua de lo propuesto, se espera construir un PFP-M6-3 equipado con sensores de temperatura, pH, acidez y gases, para laboratorio, donde se espera realizar investigación profusa y de precisión, para transferir a los agricultores cacaoteros los parámetros de diseño y operatividad que necesiten según el tipo de cacao que cultiven.

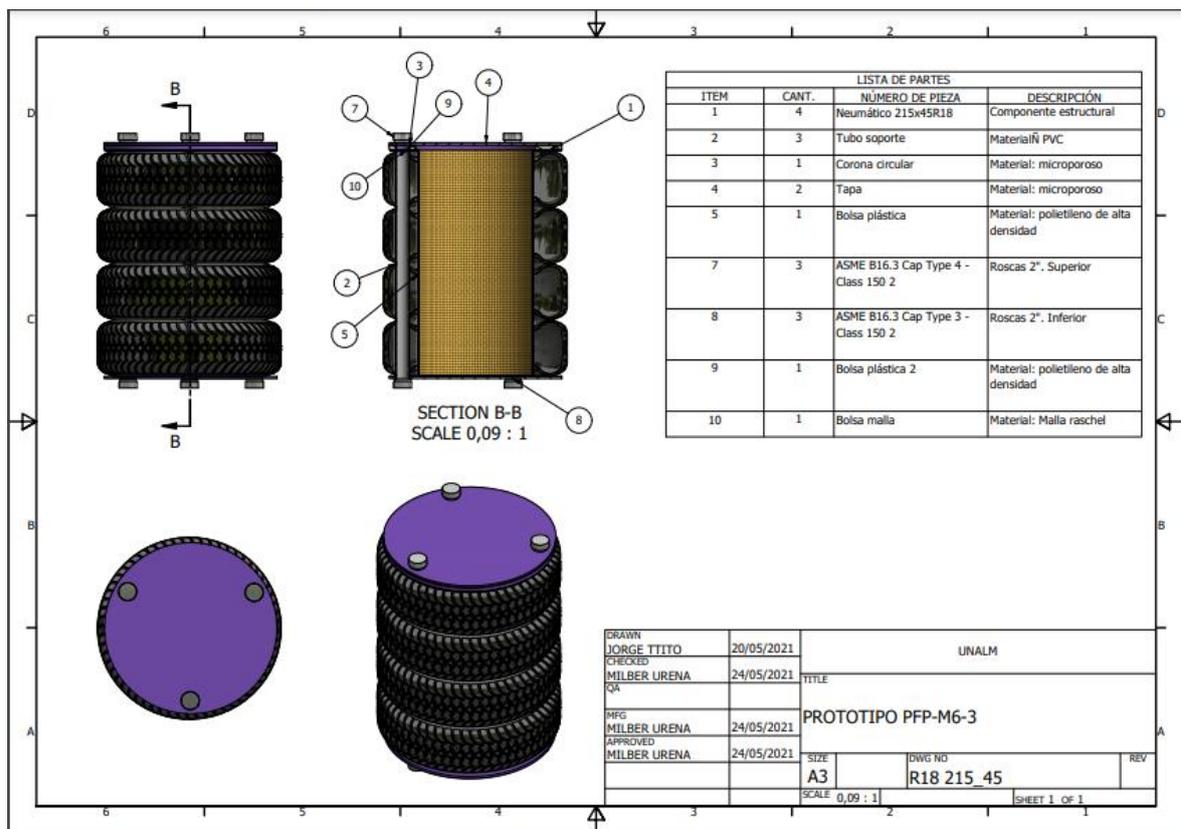
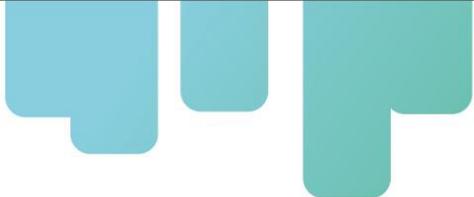


Figura 42. Prototipo de fermentador portátil PFP-M6-3.

Fuente: Elaboración propia.



## Conclusiones

Considerando los resultados de las pruebas de ensayo, se determinó que los prototipos de fermentador portátil para el campo son el PFP-M6-3 para una capacidad de 50 kg de granos de cacao en baba y el PFP-M5-3 para menos de 40 kg de granos de cacao en baba.

Considerando los resultados de las pruebas de ensayo, se determinó que el prototipo de fermentador portátil PFP-M5-4 puede ser usado para almacenar granos de cacao en baba en el campo, hasta por seis días.

El uso de llantas de descarte como material aislante ayuda a conservar la temperatura, sin embargo, se requiere un mínimo de masa a fermentar de 60 kg, con el fin de garantizar subir la temperatura de la masa.

La evaluación sensorial de los materiales no se identificaron transferencia de olores debido a los materiales trabajados, por lo que es una buena opción para garantizar procesos de beneficio en campo.

## Bibliografía

- Aka S. Koffi, N’Goran Yao, Gilbert O. Sampson, Honore G. Ouattara, Denis Bruneau, Kouakou Konan, Kadjo A. Diby (2018). Analysis of the performance of a newly designed fermenter built in local materials for improvement of cocoa fermentation, in Ivory Coast. *Journal of Applied Biosciences* 129: 13708 – 13117.
- Alegría, A. (2019). “Proceso de fermentación del cacao Chuncho (*Theobroma cacao* L), utilizando tres prototipos de fermentadores, en La Convención, Cusco”. Tesis de Maestría de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Perú. Recuperado de [http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/1521/AAG\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/1521/AAG_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Andrade-Almeida J., Rivera-García, J., Chire-Fajardo, G. C. y Ureña-Peralta, M. O. (2019). “Propiedades físicas y químicas de cultivares de cacao (*Theobroma cacao* L.) de Ecuador y Perú”. *Enfoque UTE*, vol. 10, núm. 4, pp. 1-12
- Castillo, J. (2019). “Diseño de un fermentador orientado a mejorar el proceso de fermentación del cacao criollo blanco de Piura” (Tesis de Máster en Ingeniería Mecánico Eléctrica con Mención en Automática y Optimización). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú. Recuperado de [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/4017/MAS\\_IME\\_AUT\\_033.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/4017/MAS_IME_AUT_033.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- Dym, C. L. y Little, P. (2006). “El proceso de diseño en ingeniería”. México: Editorial LIMUSA, S.A.
- Enríquez, G. A. (1985). “Curso sobre el cultivo del cacao”. Costa Rica: Centro agronómico tropical de investigación y enseñanzas.
- Espinosa, A. E., Perea, A. y Villamizar, C. (1998). “Fermente bien su cacao (Tambor rotatorio una buena opción)”. Colombia: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – CORPOICA.
- Fuller, G. W. (1994). “New food product development”. United States of America: CRC Press, Inc.
- García, P. (2000). “Caracterización microbiana, bioquímica y cinética del proceso de fermentación tradición durante el beneficio del cacao”. México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Graziani de Fariñas, Lucía, Ortiz de Bertorelli, Ligia, Álvarez, Naidely & Trujillo de Leal, América (2003). Fermentación del cacao en dos diseños de cajas de madera. *Agronomía Tropical*, 53(2), 175-188. Recuperado en 01 de septiembre de 2021, de [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0002-192X2003000200005&lng=es&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2003000200005&lng=es&tlng=es).
- Hernández, E. (2010). “Módulo: Tecnologías del cacao”. Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia.
- Iman, A. M. y Quillilli, J. A. (2019). “Elaboración y caracterización fisicoquímica y organoléptica de la pasta de cacao (*Theobroma cacao* L.) a partir de granos secos y tostados de la variedad Chuncho-Cusco”. Informe de investigación para título de la Universidad Nacional de Piura. Perú. Recuperado de <https://repositorio.unp.edu.pe/bitstream/handle/UNP/2193/IAI-IMA-QUI-2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Lazarte, José and Delgado, Roberto (2018). “Design of automatic Cocoa Fermenter based on a traditional process”. *researchgate.net*. Recuperado de

- 
- [https://www.researchgate.net/publication/326658294\\_Design\\_of\\_automatic\\_Cocoa\\_Fermenter\\_based\\_on\\_a\\_traditional\\_process](https://www.researchgate.net/publication/326658294_Design_of_automatic_Cocoa_Fermenter_based_on_a_traditional_process)
- Lerma, A. E. (2010). "Desarrollo de nuevos productos". México: CENGAGE Learning.
- Liendo, R. J. (2015). "Effect of the turning on the sensory profiles of the fermented cocoa". *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*. Recuperado de [https://www.revfacagronluz.org.ve/PDF/enero\\_marzo2015/v32n1a20154162.pdf](https://www.revfacagronluz.org.ve/PDF/enero_marzo2015/v32n1a20154162.pdf)
- Loo-Miranda, J. L. M., Chire-Fajardo, G. C. y Ureña-Peralta, M. O. (2020). "Modeling of the variation of the electrical conductivity of the leachate of cocoa with different fermentation index". *Enfoque UTE*, V.11-N.3, Jul. 2020, pp. 46-54
- Mejía, J. (2019). "Fermentación de cacao". *Academia*. Recuperado de [https://www.academia.edu/39401175/Fermentaci%C3%B3n\\_de\\_cacao](https://www.academia.edu/39401175/Fermentaci%C3%B3n_de_cacao)
- Ordoñez, E. S., Quispe, Y. y García, L. F. (2020). "Cuantificación de fenoles, antocianinas y caracterización sensorial de nibs y licor de cinco variedades de cacao, en dos sistemas de fermentación". *Scientia Agropecuaria*, 11(4), 473-481.
- Palacios, Á. L. (2008). "Establecimiento de parámetros (Físicos, Químicos y Organolépticos), para diferenciar y valorizar el cacao (*Theobroma cacao* L), producido en dos zonas identificadas al norte y sur del litoral ecuatoriano". Ecuador: Universidad Técnica de Manabí.
- Rivera, J. C. (2018). "Correlación de la porosidad con el grado de fermentación del grano de cacao peruano". Tesis de título de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3843?show=full>
- Rodríguez, J. (2011). Estudio de los volátiles de *Theobroma cacao* L., durante el proceso tradicional de fermentación de cacao. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Rojas, R., Rodríguez, C., Ruiz, C., Portales, R., Neyra, E., Patel, K., Mogrovejo, J., Salazar, G. y Hurtado, J. (2017). "Cacao Chuncho del Cusco". Pp. 116. Edit. Universidad Peruana Cayetano Heredia.
- Schubert, L. R., Rodríguez, J. M., Villar, C. A., Zavaleta, D., Ramírez, M. y Thomas, E. (2021). Beneficio del cacao Chuncho: Cosecha y Poscosecha. Perú: Bioversity International.
- Teneda, William Fabián (2016). "Mejoramiento del Proceso de Fermentación del Cacao (*Theobroma cacao* L.) Variedad Nacional y Variedad CCN51". Sevilla, España: Universidad Internacional de Andalucía. Servicio de publicaciones.
- Traill, B. y Grunert, K. G. (1997). "Product and process innovation in the food industry". United Kingdom: Blackie Academic & Professional.
- Ulrich, K. T. y Eppinger, S. D. (2013). "Diseño y desarrollo de productos". México: Mc Graw Hill Education.
- Ureña, M. O., Luyo, J. D. y Chire, G. C. (2020). "Nuevo método de control para el proceso industrial de fabricación de galletas". *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*. Vol. 7 (2), 1-8.
- Villanueva, E. (2019). "Correlación del índice de fermentación de cacao (*Theobroma cacao* L.) CCN51 con la conductividad eléctrica del líquido lixiviado". Tesis de Maestría de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú. Recuperado de <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/4213>
- Vinícius, G., Teixeira, K. y Gonzaga, E. (2012). 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.

## R Í A ANEXO 1

### ESTUDIO DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DEL FERMENTADOR DE CACAO MODELO 5

El presente trabajo consiste en evaluar la integridad estructural del fermentador de cinco llantas de aro 14, debido a que en operación está sometido a cargas estáticas y dinámicas (peso muerto y volcadura) que afectan la resistencia del sistema. Se plantea analizar los casos críticos de carga que podrían llevar a la falla de los elementos estructurales como los cuatro tubos de PVC. Las cinco llantas aro 14 unidas posibilitan un volumen de carga de 50 kg de masa de granos de cacao.

Metrado de cargas

Datos:

$$M_{llanta} = 9 \text{ kg} \quad M_{tubo} = 0.42 \text{ kg} \quad M_{prod} = 50 \text{ kg}$$

$$Fact_{carga} = 0.4 * M_{prod}$$

El modelo que se estudiará es el modelo 1, que es el modelo antes de la ventilación.



Figura 1

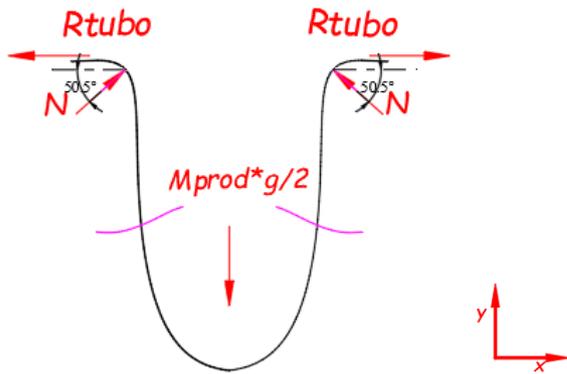
### CALCULO ANALITICO

Análisis estático

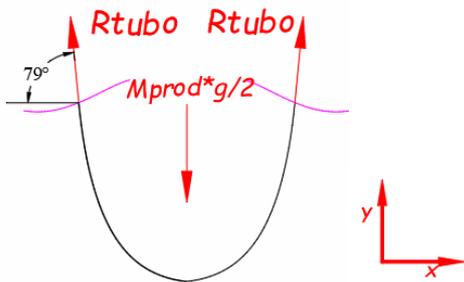
Para este análisis se hizo un cálculo simplificado de uno de los tubos, empotrado en un lado y libre en el otro. Luego se calculó el factor de seguridad para corroborar si el tubo de PVC soporta la carga estática.

$$M_{total} = M_{prod} + Fact_{carga} * M_{prod} = 70 \text{ kg}$$

Diagrama de cuerpo libre de la bolsa de carga



Se hace un corte en la bolsa para analizar las fuerzas internas



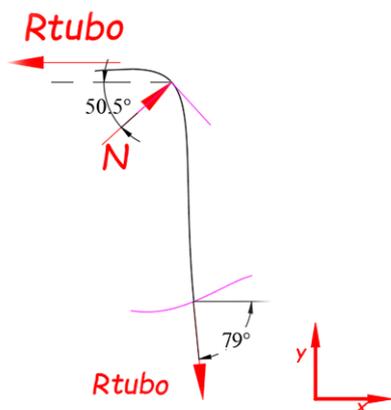
Equilibrio estático en el eje vertical.

$$\sum F_y = 0$$

$$2 * R_{tubo} * \text{sen}(\theta) - M_{prod} * g / 2 = 0$$

$$R_{tubo} = \frac{70kg * \frac{9.8m}{s^2}}{2 * \text{seno}(79^\circ)} = 174.828 N$$

Se analiza la parte izquierda del corte.

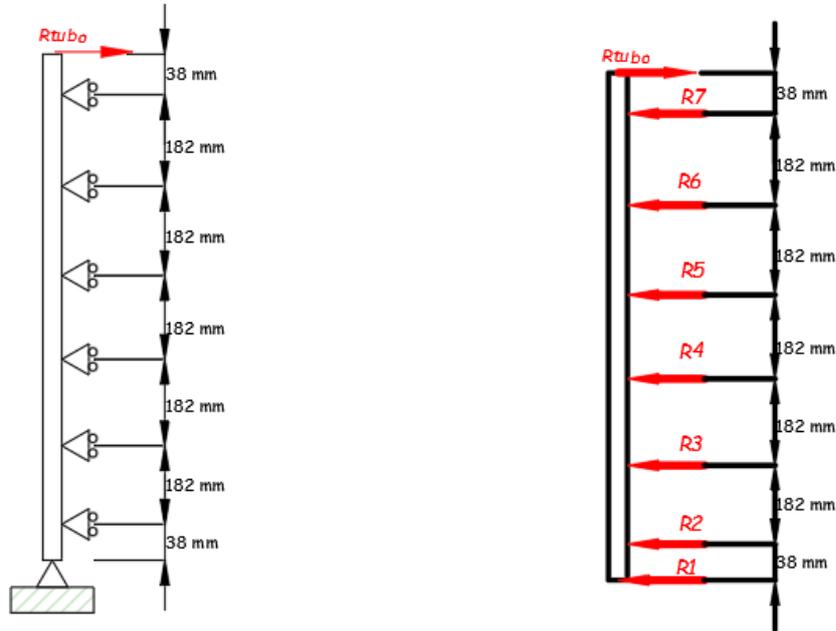


Asumimos que no hay fricción entre la llanta y la bolsa en la zona de contacto, para hacerlo más crítico. Por este motivo la fuerza horizontal es igual a la fuerza interna de la bolsa Rtubo.

Modelo simplificado del tubo

Este modelo consiste en un tubo con apoyos móviles, que se asemeja al contacto tubo con

llanta; sin embargo, para el cálculo se considera el apoyo rígido, pero da buena aproximación con respecto al modelo de simulación.



DCL del modelo simplificado

Cálculo de reacciones

Para resolver este modelo hiperestático, se aplicó el método de Cástigliano dónde se calcularon las 7 incógnitas del sistema:

- Ecuación 1  

$$-(R1 + R2 + R3 + R4 + R5 + R6 + R7) - Rtubo = 0$$

- Ecuación 2

$$R2 * 182 \text{ mm} + R3 * 220 \text{ mm} + R4 * 402 \text{ mm} + R5 * 584 \text{ mm} + R6 * 766 \text{ mm} + R7 * 948 \text{ mm} - Rtubo * 986 \text{ mm} = 0$$

- Ecuación 3

$$\int_0^{38 \text{ mm}} Mx1 * \left(\frac{dMx1}{dR2}\right) * dx + \int_{38 \text{ mm}}^{220 \text{ mm}} Mx2 * \left(\frac{dMx2}{dR2}\right) * dx + \int_{220 \text{ mm}}^{402 \text{ mm}} Mx3 * \left(\frac{dMx3}{dR2}\right) * dx + \int_{402 \text{ mm}}^{584 \text{ mm}} Mx4 * \left(\frac{dMx4}{dR2}\right) * dx + \int_{584 \text{ mm}}^{766 \text{ mm}} Mx5 * \left(\frac{dMx5}{dR2}\right) * dx + \int_{766 \text{ mm}}^{948 \text{ mm}} Mx6 * \left(\frac{dMx6}{dR2}\right) * dx + \int_{948 \text{ mm}}^{986 \text{ mm}} Mx7 * \left(\frac{dMx7}{dR2}\right) * dx = 0$$

- Ecuación 4

$$\int_0^{38mm} Mx1 * \left(\frac{dMx1}{dR3}\right) * dx + \int_{38mm}^{220mm} Mx2 * \left(\frac{dMx2}{dR3}\right) * dx$$

$$+ \int_{220mm}^{402mm} Mx3 * \left(\frac{dMx3}{dR3}\right) * dx + \int_{402mm}^{584mm} Mx4 * \left(\frac{dMx4}{dR3}\right) * dx$$

$$+ \int_{584mm}^{766mm} Mx5 * \left(\frac{dMx5}{dR3}\right) * dx + \int_{766mm}^{948mm} Mx6 * \left(\frac{dMx6}{dR3}\right) * dx$$

$$+ \int_{948mm}^{986mm} Mx7 * \left(\frac{dMx7}{dR3}\right) * dx = 0$$

- Ecuación 5

$$\int_0^{38mm} Mx1 * \left(\frac{dMx1}{dR4}\right) * dx + \int_{38mm}^{220mm} Mx2 * \left(\frac{dMx2}{dR4}\right) * dx$$

$$+ \int_{220mm}^{402mm} Mx3 * \left(\frac{dMx3}{dR4}\right) * dx + \int_{402mm}^{584mm} Mx4 * \left(\frac{dMx4}{dR4}\right) * dx$$

$$+ \int_{584mm}^{766mm} Mx5 * \left(\frac{dMx5}{dR4}\right) * dx + \int_{766mm}^{948mm} Mx6 * \left(\frac{dMx6}{dR4}\right) * dx$$

$$+ \int_{948mm}^{986mm} Mx7 * \left(\frac{dMx7}{dR4}\right) * dx = 0$$

- Ecuación 6

$$\int_0^{38mm} Mx1 * \left(\frac{dMx1}{dR5}\right) * dx + \int_{38mm}^{220mm} Mx2 * \left(\frac{dMx2}{dR5}\right) * dx$$

$$+ \int_{220mm}^{402mm} Mx3 * \left(\frac{dMx3}{dR5}\right) * dx + \int_{402mm}^{584mm} Mx4 * \left(\frac{dMx4}{dR5}\right) * dx$$

$$+ \int_{584mm}^{766mm} Mx5 * \left(\frac{dMx5}{dR5}\right) * dx + \int_{766mm}^{948mm} Mx6 * \left(\frac{dMx6}{dR5}\right) * dx$$

$$+ \int_{948mm}^{986mm} Mx7 * \left(\frac{dMx7}{dR5}\right) * dx = 0$$

- Ecuación 7

$$\int_0^{38mm} Mx1 * \left(\frac{dMx1}{dR6}\right) * dx + \int_{38mm}^{220mm} Mx2 * \left(\frac{dMx2}{dR6}\right) * dx$$

$$+ \int_{220mm}^{402mm} Mx3 * \left(\frac{dMx3}{dR6}\right) * dx + \int_{402mm}^{584mm} Mx4 * \left(\frac{dMx4}{dR6}\right) * dx$$

$$+ \int_{584mm}^{766mm} Mx5 * \left(\frac{dMx5}{dR6}\right) * dx + \int_{766mm}^{948mm} Mx6 * \left(\frac{dMx6}{dR6}\right) * dx$$

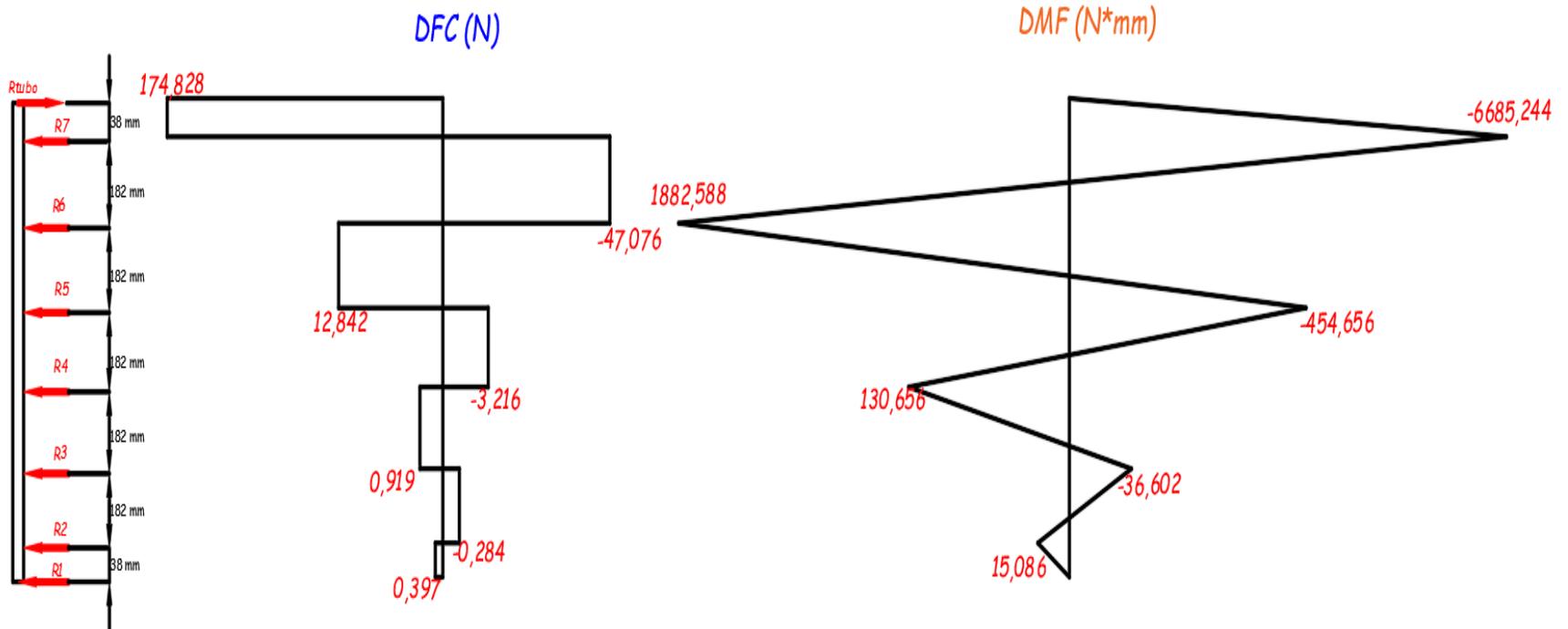
$$+ \int_{948mm}^{986mm} Mx7 * \left(\frac{dMx7}{dR6}\right) * dx = 0$$

En base a las ecuaciones se calculó los valores de las reacciones en los apoyos móviles y el fijo.

$$R1 = 0,397N ; R2 = -0,681 N ; R3 = 1,203N ; R4 = -4,135N ;$$

$$R5 = 16,058N ; R6 = -59,918 N ; R7 = 225,755N$$

Diagrama de fuerza cortante y momento flector



Con la gráfica se puede obtener el máximo momento que actúa en el tubo.

$$M_{max} = 6685,244 \text{ N}$$

### Esfuerzo equivalente

Datos:

$$\sigma F = 45.4 \text{ MPa}$$

$$D_{ext} = 33.4 \text{ mm}$$

$$D_{int} = 26.6 \text{ mm}$$

Inercia:

$$I = \pi * \frac{\left(\frac{D_{ext}}{2}\right)^4}{4} - \pi * \frac{\left(\frac{D_{int}}{2}\right)^4}{4} \quad ; \quad r = \frac{D_{ext}}{2}$$

Reemplazando:

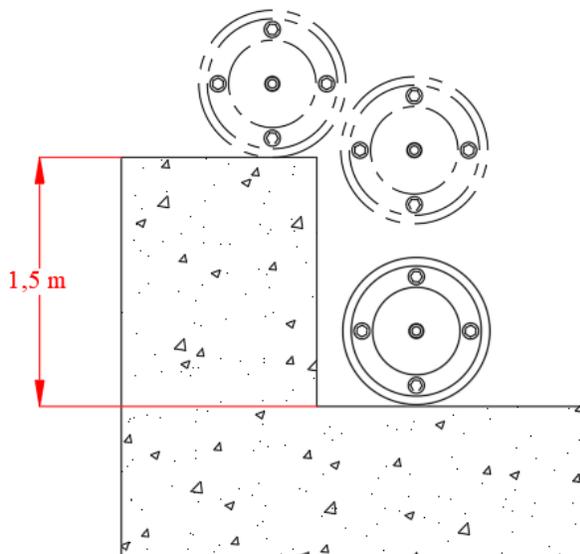
$$\sigma_{fl} = \frac{M_{max} * r}{I} = 3.058 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad

$$FS = \frac{\sigma F}{\sigma_{fl}} = 14.848$$

### Análisis dinámico

Para el cálculo analítico se consideró como caso crítico que el fermentador caerá de una altura de 1,5 metros, considerando que al momento de hacerlo rodar podría caer a un desnivel o al momento de trasladarlo caiga de la tolva de un carro.





### Cálculo de la rigidez

La rigidez del fermentador (llantas y tubos), fue proporcionada por el programa de elementos finitos.

Datos:

$$M_{ferm} = 49 \text{ kg}$$

$$\partial_{ferm} = 1.4665 \text{ mm} \quad F_{apli} = 480,2 \text{ N}$$

$$k = \frac{F_{apli}}{\partial_{ferm}} = 327,446 \text{ N}$$

### Energía Potencial

- Antes del choque

Debido a que se asume que la velocidad al momento de caer es nula, es un movimiento de caída libre, donde la única energía antes del choque es la energía potencial.

Datos:

$$h = 1,5 \text{ m}$$

$$M_{sist} = M_{ferm} + M_{total} = 49 \text{ kg} + 70 \text{ kg} = 119 \text{ kg}$$

$$E_p = M_{sist} * g * h = 1764 \text{ N.m}$$

- Durante el choque

Cuando la llanta impacta con el suelo la rigidez de la llanta comienza actuar y absorbe la energía potencial.

Entonces:

$$E_{potencial} = k * \partial_{sist}^2 / 2$$

Donde k y la energía potencial son conocidos.

$$\partial_{sist} = \frac{2 * E_{potencial}}{k}^{0,5}$$

$$\partial_{sist} = 103.8 \text{ mm}$$

### Fuerza de choque

La fuerza de choque durante el impacto:

$$F_{choque} = k * \partial_{sist} = 33988,683 \text{ N}$$

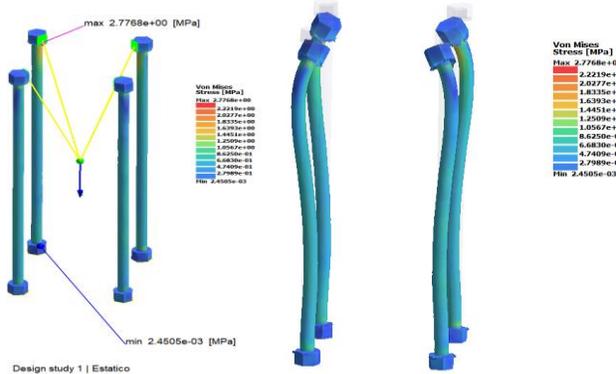
Con esta fuerza podremos analizar la resistencia de los tubos en el programa de simulación numérica.

## ANÁLISIS NUMÉRICO

Análisis estático del sistema de 4 tubos

Para el análisis estático se considera que el equipo está erguido y que soporta una carga de producto de 70 kgf. Esta carga es asignada en el modelo a través de una carga remota. Con lo cual se obtiene el siguiente resultado de esfuerzo.

Esfuerzo equivalente



En la gráfica se puede observar el esfuerzo equivalente máximo de Von Mises.

$$\sigma_{fl} = 2.7768 \text{ MPa}$$

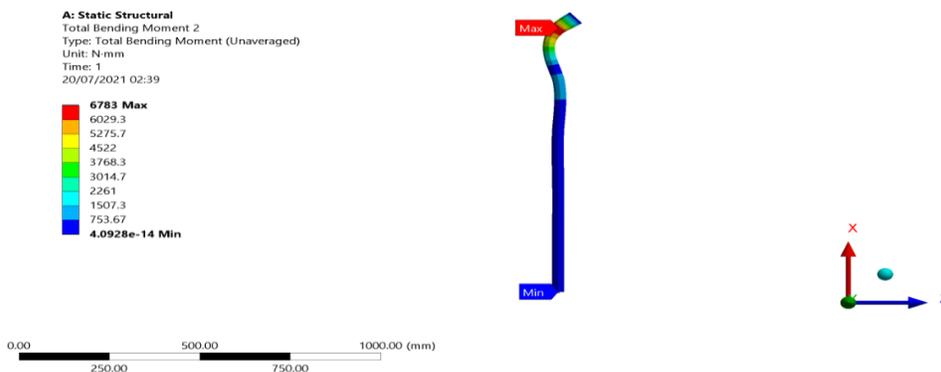
Cálculo de Factor de seguridad

$$FS = \frac{\sigma F}{\sigma_{fl}} = 14.848$$

Análisis estático del modelo simplificado

En base al modelo simplificado presentado en la parte de cálculo analítico, se llevó a cabo la simulación del comportamiento del tubo. Se le aplicó la carga del tubo ( $R_{tubo}$ ) y se halló el momento máximo.

Momento máximo



$$M_{max} = 6783 \text{ N.mm}$$



### Esfuerzo equivalente

Una vez obtenido el momento máximo se puede calcular el esfuerzo equivalente.

Datos:

$$\sigma F = 45.4 \text{ MPa}$$

$$D_{ext} = 33.4 \text{ mm}$$

$$D_{int} = 26.6 \text{ mm}$$

Inercia:

$$I = \pi * \frac{\left(\frac{D_{ext}}{2}\right)^4}{4} - \pi * \frac{\left(\frac{D_{int}}{2}\right)^4}{4} ; \quad r = \frac{D_{ext}}{2}$$

Reemplazando:

$$\sigma_{fl} = \frac{M_{max} * r}{I} = 3.102 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad

$$FS = \frac{\sigma F}{\sigma_{fl}} = 14.634$$

### Análisis dinámico

Para poder estudiar el comportamiento del equipo de fermentación se modeló lo más fielmente posible el equipo. En este modelo se consideró que el equipo presentaba una cantidad de 5 llantas (49 kg), 4 tubos roscados de 1 pulgada y los respectivos accesorios o elementos de sujeción. La simulación numérica del modelo desarrollado se realizó en el software SIMSOLID, el cual realiza una simulación del tipo sin malla (Meshless), cuya principal característica es la de no necesitar discretizar el modelo para realizar el análisis (se basa en los principios extremales y funciones de interpolación externas al espacio SOBOLEV que convergen en el límite de este). Por lo tanto, no se encontrará en la explicación de esta parte criterios de convergencia de malla o tipo de elemento sólido utilizado (hexaédricos, tetraédricos, primer o segundo orden, etc).

El proceso de trabajo para poder determinar que el modelo numérico predecía adecuadamente el comportamiento del fermentador se basó en comparar los resultados analíticos obtenidos en el análisis dinámico y la simulación que replicaba este caso. Por lo cual, era necesario conocer la rigidez del sistema a analizar. Esta rigidez fue determinada a partir del modelo de la simulación numérica, ya que no era posible obtenerla mediante ensayos experimentales.

### Propiedades mecánicas del PVC y CAUCHO

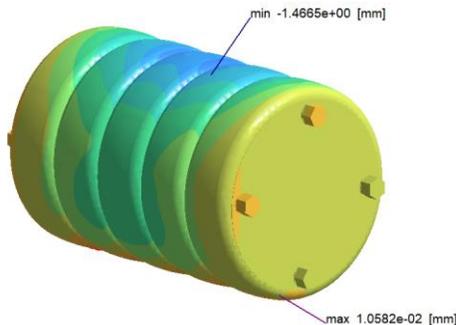
El modelo numérico requiere que se le asignen las propiedades mecánicas del material o materiales a analizar. Por lo cual, se asignó las propiedades mecánicas para el caucho y pvc (tab. 1).

	E (MPa)	Fy (MPa)	Fu (MPa)	v
Caucho	15.4	70	60	0.5
PVC	2410	45.6	53	0.38

Tabla 1

### Cálculo de la rigidez

La rigidez del equipo se obtuvo al determinar la deformación vertical para la condición en la que el equipo está recostado sobre el suelo sin carga del producto, como se en la siguiente figura:



Como se observa se determinó que el equipo se desplaza un máximo de 1.4665 mm. Con este dato es posible obtener el valor de la rigidez considerando que el equipo tiene una masa aproximado de 49kg.

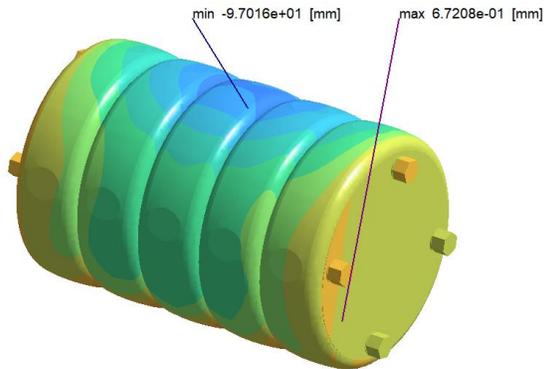
$$k = \frac{masa * g}{\delta} = \frac{49 \text{ kg} * 9.81 \frac{m}{s^2}}{1.4665mm} = 327.668 \frac{N}{mm}$$

### Análisis dinámico

Para el análisis dinámico se tuvo que determinar el valor de la aceleración máxima que se produce durante el choque del equipo con carga cuando cae desde 1.5m de altura (caso crítico). Posterior a esto, se evaluó cuantas veces la gravedad es este valor y se determinó que era alrededor de 28 veces la gravedad. Con esta relación de 28G se implementó en el software de SIMSOLID un escenario equivalente (al de impacto) que considera esta amplificación de la gravedad para poder determinar los esfuerzos, desplazamientos. De la siguiente figura se observa la distribución de esfuerzos en los tubos.

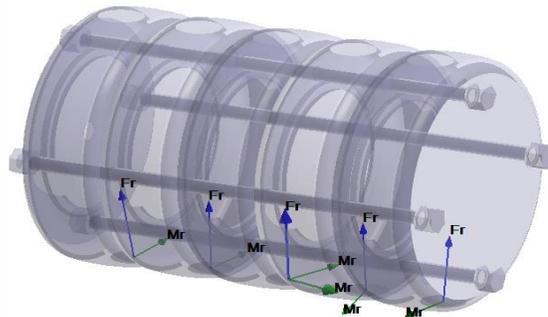
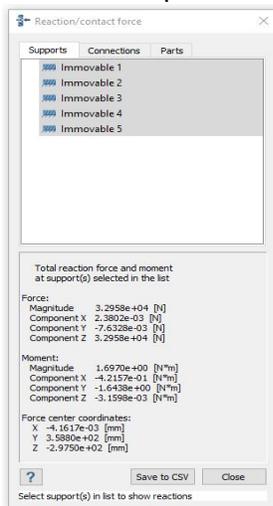


## Desplazamientos en condición de impacto



## Fuerza de impacto

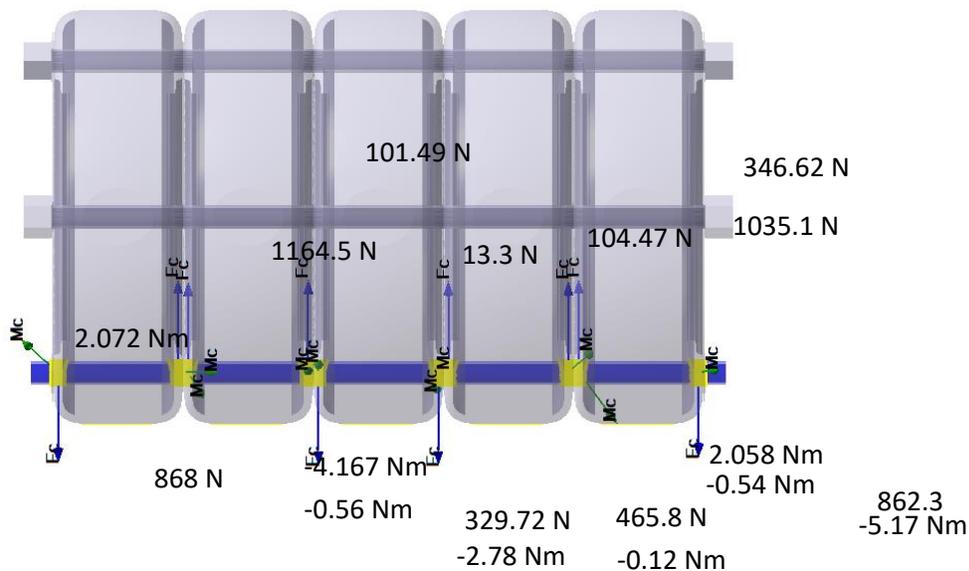
Se determina las reacciones en la llanta producto del impacto y se determina que se obtiene una fuerza de impacto de 3295.8 kgf



$$F_{choque} = 3295.8 \text{ kgf}$$

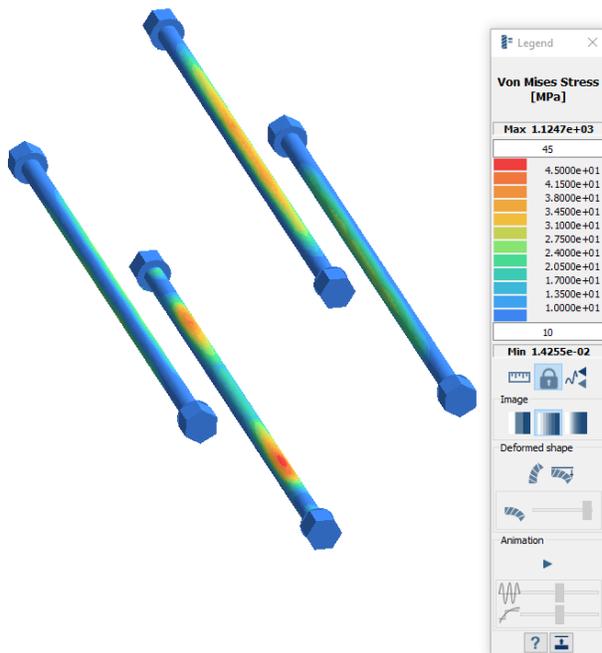
## Fuerzas de reacción en el tubo más crítico

Debido al impacto del equipo se producen las reacciones entre los contactos del agujero de las llantas con los tubos. Por lo cual, se presentan estas reacciones. Las fuerzas están en el sentido como se indica (por eso no tiene signo). Los momentos están con signo, ya que un valor positivo indica que es en dirección del eje x positivo y un valor negativo es en dirección del eje x negativo.

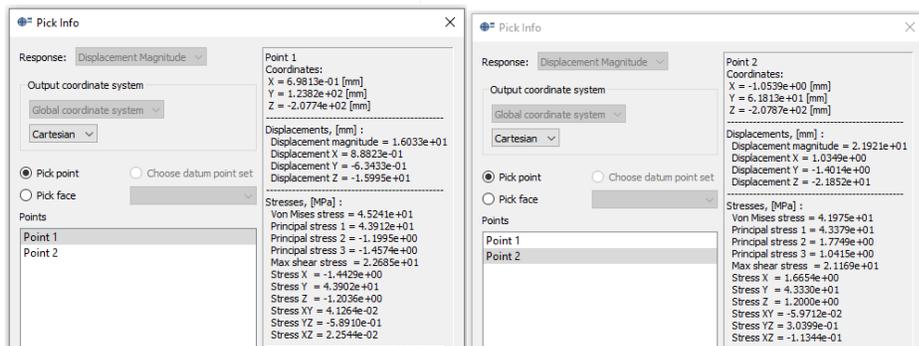


### Esfuerzos en los tubos

El tubo es el elemento estructural de este equipo, ya que tiene el propósito de dar rigidez lateral y que el equipo se mueva lo más solidariamente posible. A continuación se presenta en la siguiente figura la distribución de esfuerzos en los tubos.



en la siguiente figura se observa los esfuerzos en dos puntos en específico y se observa que se tienen esfuerzos cercanos al de fluencia, por ende Factores de seguridad bajos en las zonas mencionadas, ver Tabla 2 .



Punto	Esfuerzo (MPa)	Fy (MPa)	FS
1	45	45.6	1.013
2	42	45	1.07

Tabla 2

### Discusión de resultados

Del modelo analítico desarrollado para el análisis estático, del modelo conceptual del análisis dinámico y de las simulaciones se ha determinado que para el caso estático el equipo opera sin inconvenientes. Por otro lado, del análisis dinámico se observa que el modelo numérico y modelo conceptual presentan valores de Fuerza de impacto similares y que presentan un error relativo respecto al modelo conceptual de 4.6%. Es decir, el modelo numérico está acorde a los cálculos analíticos. Una vez determinado que no habrá mayor desviación en los resultados se analizan los esfuerzos. Los esfuerzos obtenidos del modelo numérico se encuentran cercanos al esfuerzo de fluencia del material y presentan un factor de seguridad muy cercanos al de seguridad. Por lo cual, se informa que no debe de permitirse que el equipo caiga de una altura de 1.5m cuando se encuentra cargado con el producto, ya que esto podría provocar deformaciones permanentes en los tubos de PVC.

## R Í A ANEXO 2

### SELECCIÓN DEL NEUMÁTICO PARA EL POTOTIPO DE FERMENTADOR MODELO 5

El presente trabajo consiste en seleccionar las medidas que debe tener el neumático o llanta de aro 14, como elemento estructural del prototipo de fermentador de granos de cacao modelo 5, para la mayor conservación del calor durante la operación, cumpliendo la función de material aislante. Para tal fin, se identificará las variables que han de intervenir en el estudio térmico, hacer la simulación CFD y finalmente seleccionar el tipo de llanta para el prototipo.

#### DEFINICIÓN DEL TIPO DE LLANTA

Para definir el tipo de llanta se tomará información técnica de los neumáticos de la marca "PIRELLI", en lo referente a las especificaciones técnicas expresadas en el código de la llanta (fig.1).

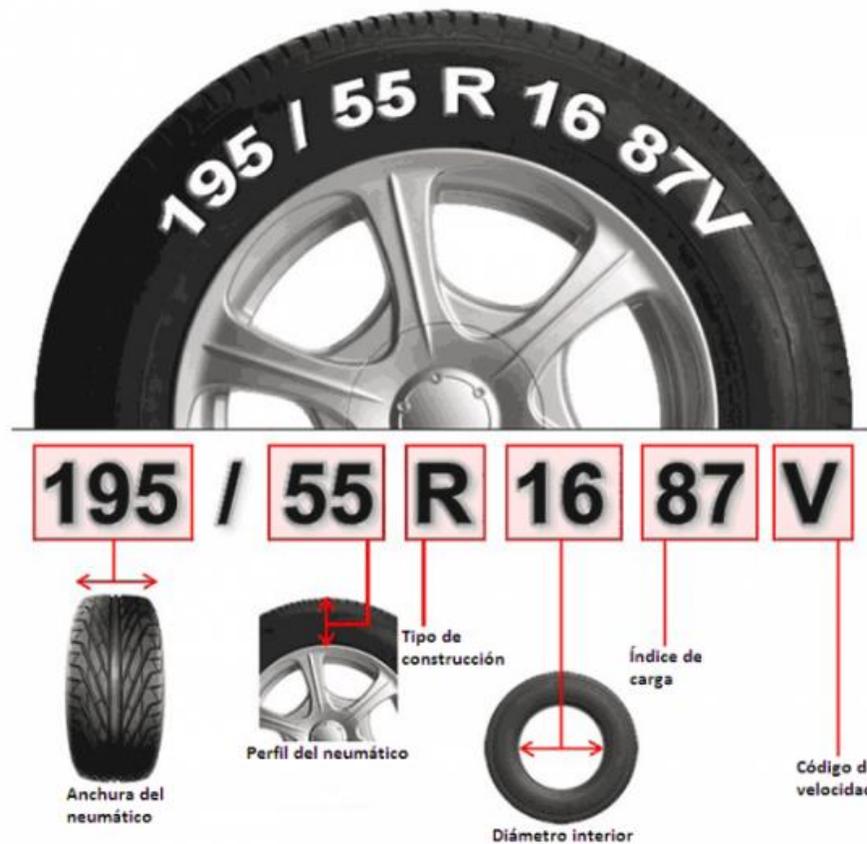
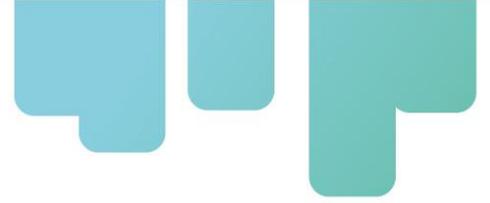


Figura 1. Codificación de un neumático.



1. **Ancho del neumático:** El ancho de la llanta está en milímetros, se mide de extremo a extremo de la banda de rodamiento.
2. **Perfil:** Es la relación que existe entre la altura del costado y el ancho de la llanta. En la imagen, la altura del perfil es el 55% de su ancho. Entre más bajo sea la relación, más pequeño será el perfil, lo cual significa mejor agarre en curvas, pero una conducción más dura. grueso del costado interno.
3. **Construcción:** Esta es la construcción interna de la llanta, la cual es «radial». Prácticamente todas las llantas que hay en la calle tienen construcción radial, lo cual significa que las cuerdas o hilos que se encuentran debajo del labrado corren por el ancho de la llanta sin entrecruzarse, desde un borde hasta el otro, semejando lo que serían radios de un círculo.
4. **Diámetro del Rin:** Este número (en pulgadas) indica que la llanta está diseñada para montarse sobre un rin de 16 pulgadas de diámetro.

Conociendo lo que significa la codificación de los neumáticos se definirá el tipo de llanta a partir de los valores que la caracteriza, escogiendo la que tiene como diámetro del Rin el número 14, por ser el tipo de llantas que usan los automóviles de mayor circulación en las ciudades.

### IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES PARA EL ESTUDIO TÉRMICO

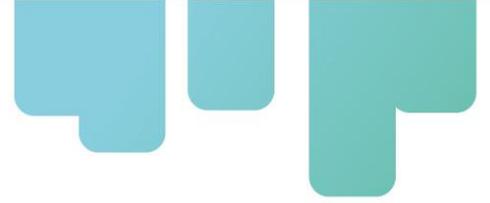
Considerando el área de transferencia de calor de la llanta como componente del prototipo de fermentador y la identificación de la misma a través de su codificación, se definen como variables para el estudio térmico: el ancho de neumático (A), el perfil del neumático (B) y el diámetro interior (R). En la tabla 1 se presentan los valores máximos y mínimos correspondientes a las variables definidas.

Tabla 1. Valores de las variables definidas para el estudio térmico del prototipo.

R	A	B
14	155	65
	185	60

Fuente: <https://www.pirelli.com/tyres/es-mx/turismo/buscar-neumaticos/busque-por-medida>

Para determinar los valores de A y B que mejor describen la evolución de la temperatura de la masa de granos de cacao durante la fermentación bajo condiciones que simulan la variación de



temperatura del ambiente en el día y la noche, se plantea una metodología de Superficie respuesta que brinda el modelo ortogonal de la tabla 2. El registro de los grados de temperatura se realiza cada 7 horas.

Tabla 2. Modelo ortogonal del método de Superficie de respuesta

ITEM	A	B	$\Delta T$
1	155	60	
2	170	60	
3	185	60	
4	155	62.5	
5	170	62.5	
6	185	62.5	
7	155	65	
8	170	65	
9	185	65	

Fuente: Elaboración propia.

### PROCESO DE SIMULACIÓN

Se generaron modelos en 3D (fig. 2 y 3) para realizar la simulación que fueron desarrollados en el programa Autodesk Inventor 2020 Pro. Se tomó como base una hipotética evolución de temperaturas en la masa de granos de cacao en la fermentación. El objetivo es conocer qué modelo es el que menos se aleja del correspondiente a la evolución hipotética.

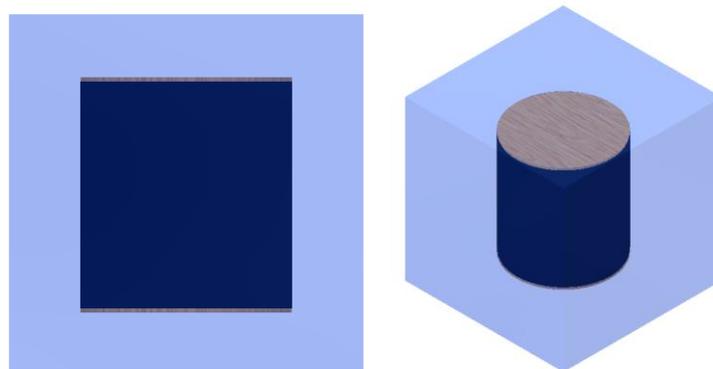


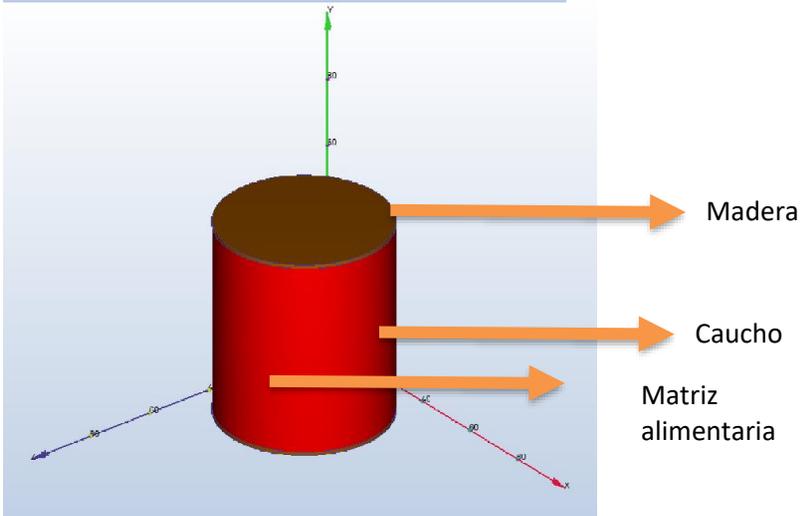
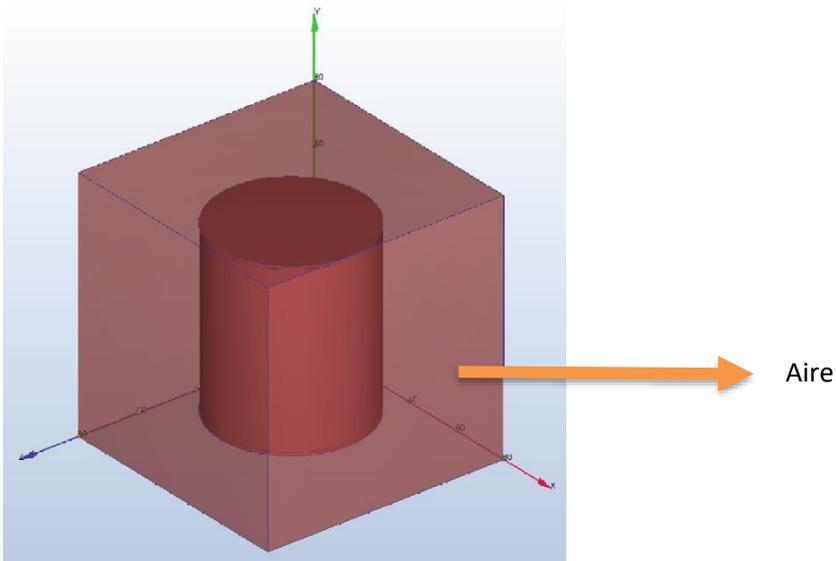
Figura 2. Representación gráfica del modelo.

Fuente: Elaboración propia.



Los modelos desarrollados cuentan con los siguientes componentes:

- Cubierta de aire
- Tapas de madera
- Llantas (contorno)
- Interior de matriz alimentaria



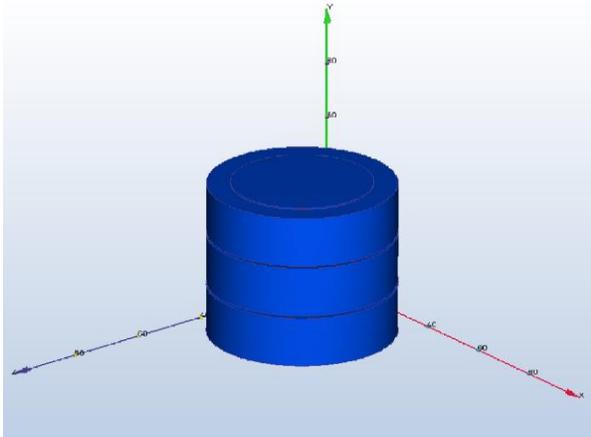


Figura 3. Modelos desarrollados para el estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez desarrollados los modelos en 3D se procedió a llevarlos al programa Autodesk CFD 2020 y se siguieron los siguientes pasos para analizar los modelos:

- Asignación de materiales de estudio a las piezas
- Asignación de las condiciones iniciales
- Asignación de las condiciones de contorno
- Asignación del tipo de malla
- Asignación de la resolución en estado transiente

A continuación, se detalla el desarrollo de estos pasos:

### Asignación de materiales de estudio a las piezas

En la tabla 3 se presentan las propiedades que se han designado a las piezas.

Tabla 3. Modelo ortogonal del método de Superficie de respuesta

Nombre	asiganado a	PROPIedadeS	
Aire	Part1.Body1	Densidad	Ecuación de estado
		Viscosidad	1.817e-05 Pa-s
		Conductividad	0.02563 W/m-K
		Calor específico	1004.0 J/kg-K
		Compresibilidad	1.4
		Emisividad	1.0
		Rugosidad de la pared	0.0 meter
		Fase	Presión de vapor
Madera (suave)	Part1.Body5	Densidad	510.0 kg/m3
	Part1.Body3	Calor específico	1380.0 J/kg-K

Caucho	Part1.Body4	Emisividad	0.8
		Transmisividad	0.0
		Resistividad eléctrica	3e+20 ohm-m
		Rugosidad de la pared	0.0 meter
		Densidad	1.7 g/cm <sup>3</sup>
		Calor específico	0.7 J/g-K
		Emisividad	0.9
Matriz	Part1.Body2	Transmisividad	0.0
		Resistividad eléctrica	0.0 ohm-cm
		Rugosidad de la pared	0.0 meter
		Densidad	Lineal por partes
		Viscosidad	0.001003 Pa-s
		Conductividad	0.6 W/m-K
		Calor espeífico	4182.0 J/kg-K
		Compresibilidad	2185650000.0 Pa
		Emisividad	1.0
		Rugosidad de la Fase	0.0 metros Material de vapor

Fuente: Elaboración propia

### **Asignación de las condiciones iniciales**

Para las condiciones iniciales se toma como función patrón la siguiente evolución de temperaturas, de un proceso de fermentación de granos de cacao. Adicionalmente, se ha considerado una variación de la temperatura ambiental con respecto a las horas en el día y en la noche (fig. 4). Se realizaron 29 evaluaciones por cada modelo en donde se asignó la temperatura ambiental correspondiente y la temperatura a la que está la masa de granos de cacao fermentándose.

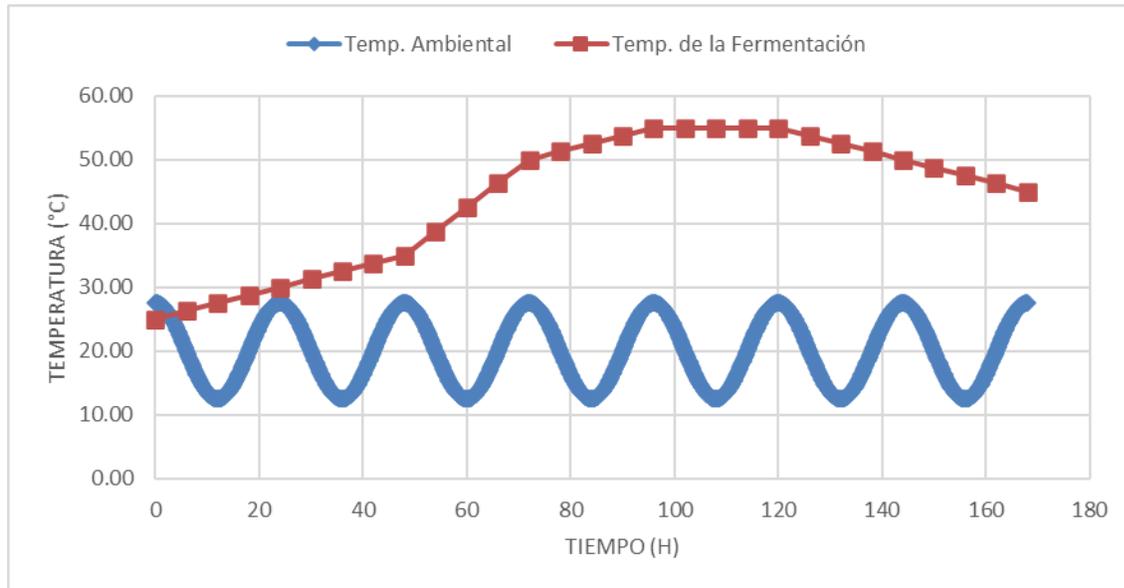


Figura 4. Evolución hipotética de la temperatura de la fermentación y la ambiental.  
Fuente: Elaboración propia.

### **Asignación del tipo de malla**

Para la construcción de la malla se asignaron valores que a continuación se presentan:

#### *Configuraciones automáticas de mallado*

Refinamiento de la superficie	1
Refinamiento de brecha	0
Factor de resolución	1.0
Tasa de crecimiento del borde	1.1
Puntos mínimos en el borde	2
Puntos en el borde más largo	10
Relación de aspecto limitante de	20
Tasa de crecimiento superficial	1.2
Tasa de crecimiento de mejora	1.1

#### *Configuración de mejora de malla*

Mejora de malla	1
Mezcla de mejora	0
Número de capas	3
Factor de capa	0.45
Gradación de capa	1.05

Número de nodos	2631
Número de elementos	8648

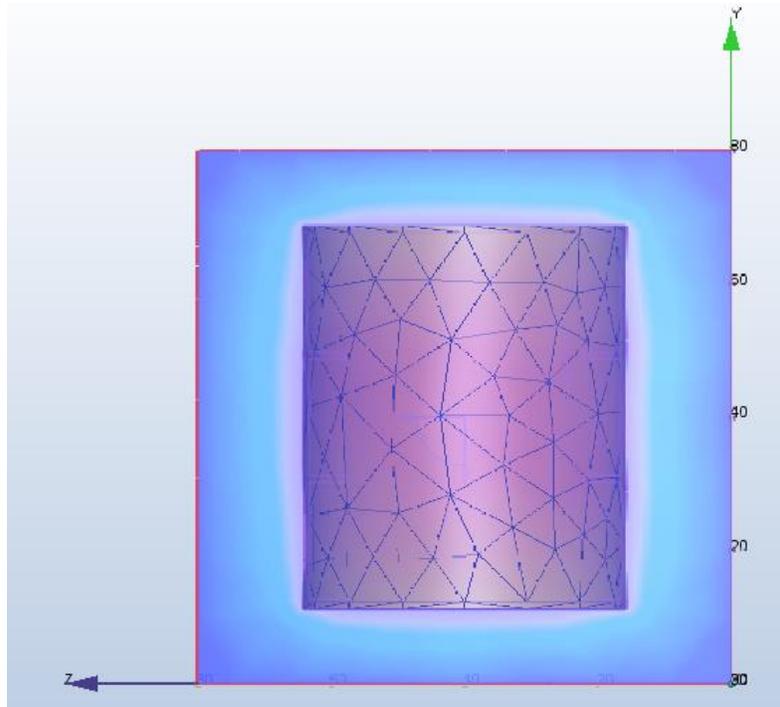


Figura 5. Modelo de malla.

Fuente: Elaboración propia.

### **Asignación de la resolución en estado transiente**

Configuración para la solución:

Modo de solución: **Transitorio**

Modelo de turbulencia: **k.épsilon**

Convergencia:

Iteraciones a ejecutarse: **500**

Tiempo de evaluación: **21600**

### **Resolución de la simulación**

En la figura 6 se representa de forma gráfica un estado de la evolución de la temperatura en un proceso fermentativo simulado, tanto en la malla de cálculo como en la imagen coloreada. Cada uno de estos estados definidos por su correspondiente temperatura son graficados para cada modelo ensayado en la figura 7.

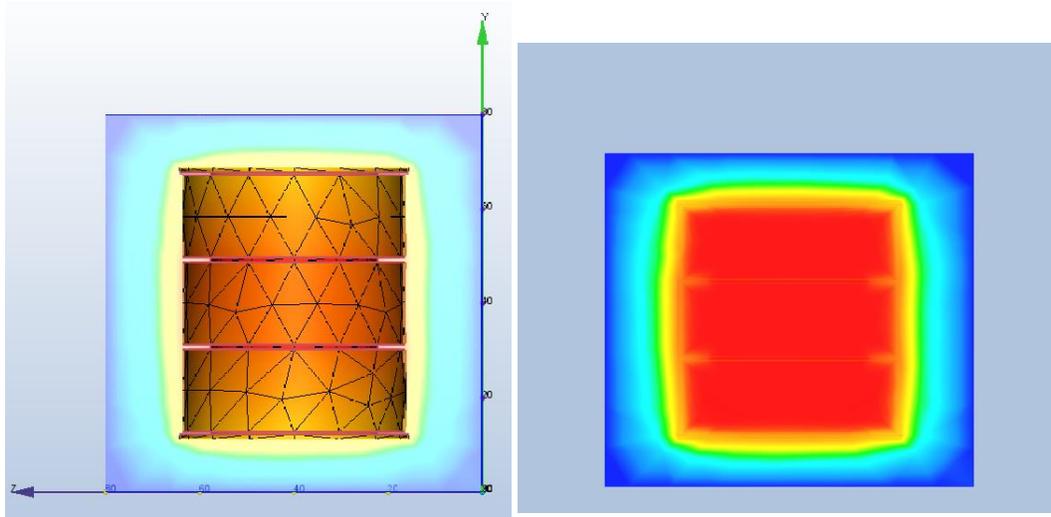


Figura 6. Representación de un estado en malla de cálculo e imagen coloreada.

Fuente: Elaboración propia.

La diferencia que tienen los modelos calculados con respecto a la curva de fermentación patrón es perceptible a partir del resultado de la evaluación número 13 de las 29 programadas (fig. 7), es por ello que para tener un valor que represente en cuanto se diferencian cada uno de los 9 modelos calculados con el de la fermentación patrón, es que se calcula el promedio de las diferencias de temperaturas de las siguientes 16 evaluaciones, las que están registradas en la tabla 4 según el modelo ortogonal aplicado del método de Superficie de respuesta.

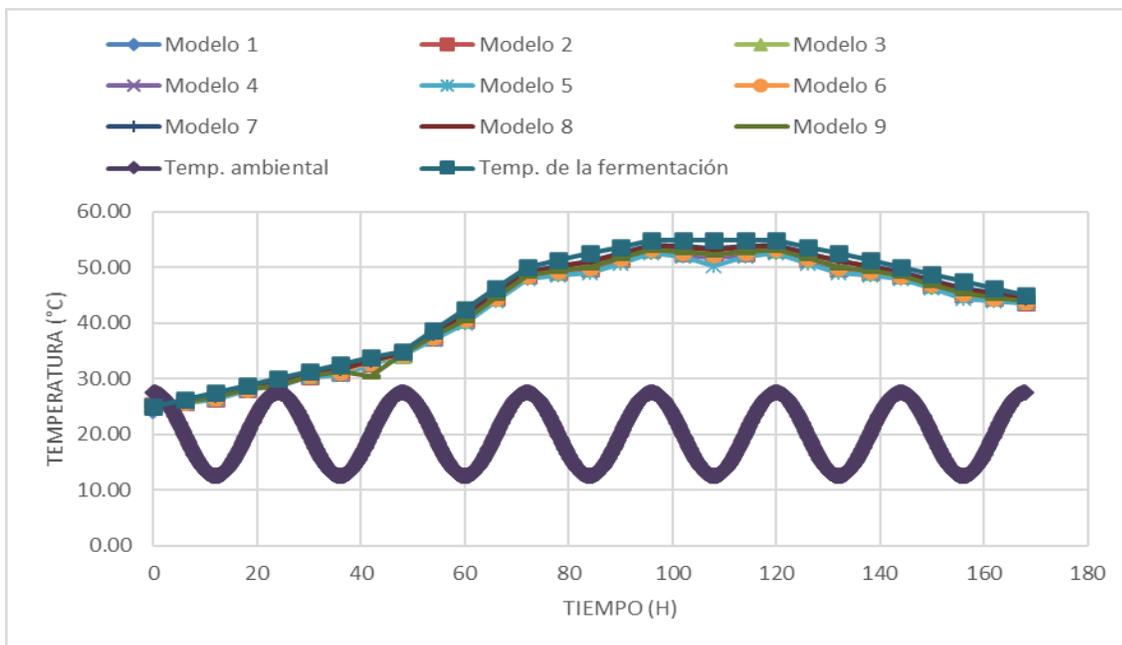


Figura 7. Evolución de la temperatura de modelos y ambiental.



Tabla 4. Modelo ortogonal del método de Superficie de respuesta con valores promedio de diferencias de temperatura de cada modelo

Modelo	A	B	$\Delta T$
1	155	60	1.92
2	170	60	2.05
3	185	60	2.21
4	155	62.5	2.43
5	170	62.5	2.79
6	185	62.5	1.87
7	155	65	1.07
8	170	65	1.2
9	185	65	1.9

Fuente: Elaboración propia

### SELECCIÓN DEL TIPO DE LLANTA

Al aplicar el método de superficie respuesta considerando los valores de la tabla 4, se obtuvo la siguiente ecuación que la describe y que se representa en las figuras 8 y 9:

$$\text{Temp} = 94.7893 + 0.13263*A - 3.42533*B + 0.0000148148*A^2 - 0.00226667*A*B + 0.0309333*B^2$$

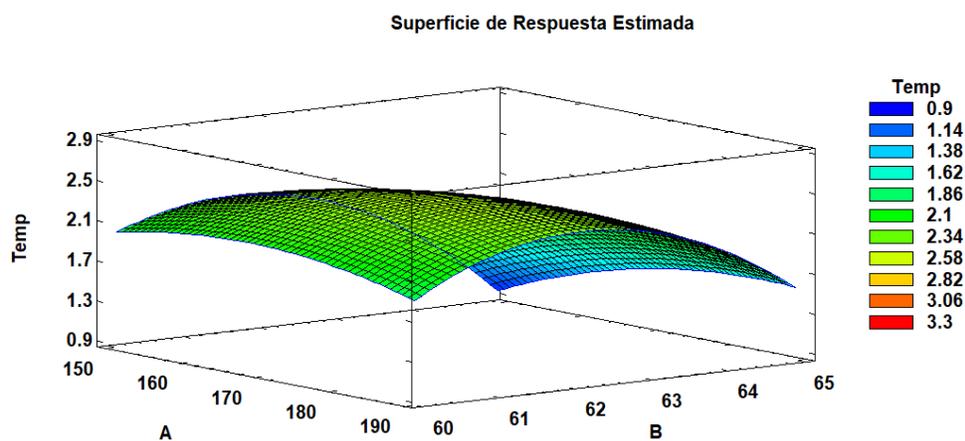


Figura 8. Superficie de respuesta.

Fuente: Elaboración propia.

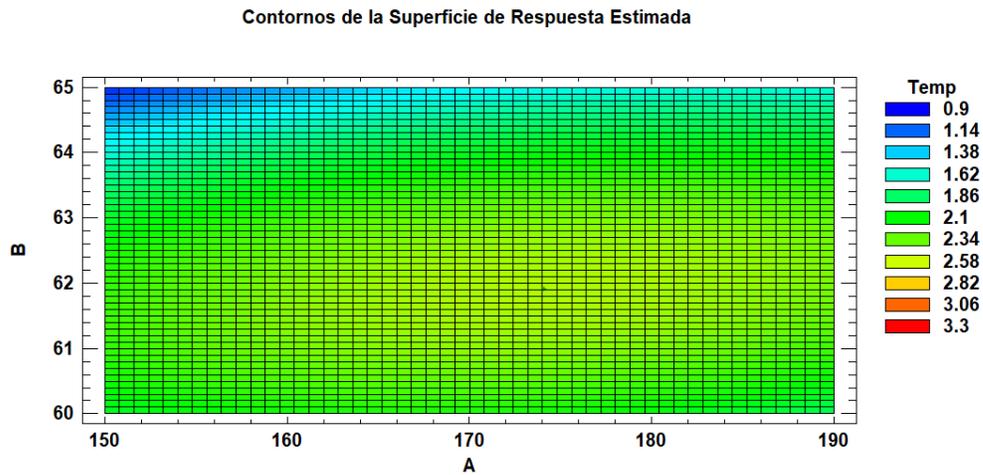


Figura 9. Superficie de respuesta (contornos).

Fuente: Elaboración propia.

Con este resultado se concluye que:

- Mientras más pequeño el ancho del neumático (factor A) menor diferencia de temperatura se presenta en el modelo.
- Mientras más grande el perfil (factor B) menor diferencia de temperatura se presenta en el modelo.

Considerando los resultados obtenidos se selecciona el modelo de llanta 155/65 R14.



# Instituciones participantes



Secretaría Técnica Administrativa



Con el apoyo de:



[www.fontagro.org](http://www.fontagro.org)

Correo electrónico: [fontagro@fontagro.org](mailto:fontagro@fontagro.org)