



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DEL MUCÍLAGO DE CAFÉ ASISTIDO
ENZIMÁTICAMENTE Y SUS EFECTOS EN EL PRESECADO DEL GRANO EN PERGAMINO**

Carlos Mauricio Menchú Alvarez

Asesorado por el Ing. Hans Dieter Marroquín Lang

Guatemala, octubre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DEL MUCÍLAGO DE CAFÉ ASISTIDO
ENZIMÁTICAMENTE Y SUS EFECTOS EN EL PRESECADO DEL GRANO EN PERGAMINO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CARLOS MAURICIO MENCHÚ ALVAREZ
ASESORADO POR EL ING. HANS DIETER MARROQUÍN LANG

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADOR	Ing. Victor Manuel Monzón Valdez
EXAMINADOR	Ing. César Ariel Villela Rodas
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DEL MUCÍLAGO DE CAFÉ ASISTIDO
ENZIMÁTICAMENTE Y SUS EFECTOS EN EL PRESECADO DEL GRANO EN PERGAMINO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 16 de octubre de 2017.



Carlos Mauricio Menchú Álvarez

Guatemala, 16 de julio de 2019

Ingeniero
Williams Guillermo Alvarez Mejía
Director Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Estimado Ingeniero Alvarez:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y aprobado el Informe final de trabajo de graduación "Evaluación de la Remoción del Mucílago de Café Asistido Enzimáticamente y sus Efectos en el Presecado del Grano en Pergamino", del estudiante de Ingeniería Química Carlos Mauricio Menchú Alvarez, quien se identifica con carné estudiantil número 201404092 y DPI No.2738 34126 0101.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente.



Ing. Qco. Hans Dieter Marroquín Lang
Colegiado No. 790
Asesor

Hans Marroquín Lang
Ingeniero Químico
Colegiado No. 790



Guatemala, 19 de julio de 2019.
Ref. EIQ.TG-IF.026.2019.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez Mejía:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo 059-2017 le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad Seminario de Investigación-**

Solicitado por el estudiante universitario: **Carlos Mauricio Menchú Alvarez**.
Identificado con número de carné: **2738 34126 0101**.
Identificado con registro académico: **2014 04092**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DEL MUCÍLAGO DE CAFÉ
ASISTIDO ENZIMÁTICAMENTE Y SUS EFECTOS EN EL
PRESECADO DEL GRANO EN PERGAMINO**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el profesional: **Ingeniero Químico Hans Dieter Marroquín Lang**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Hilda P. Ramos de Martíni

Inga. Hilda Piedad Palma Ramos de Martíni
COORDINADORA DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.063.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación, de la carrera de Ingeniería Química, del estudiante, **CARLOS MAURICIO MENCHÚ ALVAREZ** titulado: **“EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DEL MUCÍLAGO DE CAFÉ ASISTIDO ENZIMÁTICAMENTE Y SUS EFECTOS EN EL PRESECADO DEL GRANO EN PERGAMINO”**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

“Id y Enseñad a Todos”

Ing. Williams G. Álvarez Mejía; M.I.Q., M.U.I.E
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, octubre de 2019

Cc: Archivo
WGAM/ale





Ref. DTG.473.2019

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DEL MUCÍLAGO DE CAFÉ ASISTIDO ENZIMÁTICAMENTE Y SUS EFECTOS EN EL PRESECADO DEL GRANO EN PERGAMINO**, presentado por el estudiante universitario: **Carlos Mauricio Menchú Alvarez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.




Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, Octubre de 2019

AACE/asga
cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por ser mi principal apoyo, brindarme su amor incondicional y ser mi mayor motivación.

Mi familia

Por ser gran influencia positiva en mi vida y brindarme su apoyo y amor incondicional.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por tenerme paciencia, por brindarme su ayuda y amor a lo largo de la carrera.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser una importante influencia en mi carrera, y ser parte de mi vida profesional.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme sus conocimientos.
Mi familia	Por apoyarme incondicionalmente y permitirme alcanzar este logro.
Mi asesor	Hans Marroquín, por apoyarme y brindarme el tiempo necesario para el desarrollo del presente trabajo.
Mis amigos	Por ayudarme en el desarrollo de mi tesis, en el desarrollo de la carrera y mi vida personal.
César Arrécis	Por abrirme las puertas para realizar el presente trabajo, enseñarme y ser un gran ejemplo para mi vida.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Origen del café	3
2.2. Historia del café en Guatemala	4
2.3. Caracterización del grano de café	5
2.4. Enzimas.....	6
2.4.1. Generalidades	6
2.4.2. Enzimas para la remoción del mucílago de café	8
2.4.3. Pectinasa	9
2.5. Química de la fermentación en el café	9
2.6. Etapas del procesamiento de café	12
2.6.1. Recolección del café.....	12
2.6.2. Recepción del café	13
2.6.3. Primera clasificación.....	14
2.6.4. Despulpado del café	15
2.6.5. Segunda clasificación	16

2.6.6.	Remoción del mucílago de café	17
2.6.6.1.	Caracterización del mucílago y su remoción.....	17
2.6.6.2.	Métodos para la remoción de mucílago.....	19
2.6.6.2.1.	Fermentación natural	19
2.6.6.2.2.	Enzimático.....	20
2.6.6.2.3.	Mecánico.....	21
2.6.7.	Lavado del café	22
2.6.8.	Secado del café.....	23
2.6.9.	Trillado y Almacenamiento del Café.....	24
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	27
3.1.	Variables	27
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	27
3.3.	Recursos humanos disponibles	28
3.4.	Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos).....	28
3.5.	Técnica cuantitativa o cualitativa.....	30
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	32
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	36
3.8.	Análisis estadístico.....	44
3.8.1.	Media aritmética	44
3.8.2.	Desviación estándar	44
3.8.3.	Análisis de varianza	45
3.8.4.	Prueba de Tukey	45
4.	RESULTADOS.....	47

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	53
CONCLUSIONES	57
RECOMENDACIONES.....	59
BIBLIOGRAFÍA.....	61
APÉNDICES	63
ANEXOS	79

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Tipos de café: arábica y robusta	3
2.	Café para exportar, muelle de San José, 1910	4
3.	Partes del café en cerezo.....	5
4.	Cinética enzimática	7
5.	Reacciones principales en la remoción del mucílago de café	10
6.	Recolección del café, Tenerife, España	13
7.	Sifón vertical, recepción de café	14
8.	Tanque vertical de fondo cónico, primera clasificación	15
9.	Pulperos, despulpado del café	16
10.	Cribas giratorias, segunda clasificación	17
11.	Pilas para fermentado del café y remoción del mucílago	20
12.	Remoción del mucílago de café, enzimáticamente	21
13.	Remoción del mucílago de café, mecánicamente	22
14.	Secado del café en patio, presecado	24
15.	Almacenamiento del café en sacos.....	25

TABLAS

I.	Densidades del café en varias etapas del procesamiento	6
II.	Medición del peso y pH de la muestra de café recién despulpado previos al proceso de desmucilaginado de café.....	32
III.	Medición del peso y pH de la muestra de café recién despulpado posterior al proceso de desmucilaginado de café	33
IV.	Medición de los tiempos de remoción del mucílago de café	34

V.	Medición del peso y porcentaje de humedad de la muestra de café recién desmucilaginado previos al proceso de presecado de café	34
VI.	Medición del peso y porcentaje de humedad de la muestra de café recién desmucilaginado posterior al proceso de presecado de café.....	35
VII.	Medición de los tiempos de presecado de café	35
VIII.	Análisis de los pesos de las muestras de café recién despulpado, previo al proceso de desmucilaginado de café	36
IX.	Análisis de los pesos de las muestras de café recién despulpado, posterior al proceso de desmucilaginado de café	36
X.	Diferencia de los pesos promedio de las muestras de café recién despulpado, previo y posterior al proceso de desmucilaginado de café	37
XI.	Análisis de los pH de las muestras de café recién despulpado, previo al proceso de desmucilaginado de café	37
XII.	Análisis de los pH de las muestras de café recién despulpado, posterior al proceso de desmucilaginado de café	38
XIII.	Diferencia de pH promedio de las muestras de café recién despulpado, previo y posterior al proceso de desmucilaginado de café	39
XIV.	Análisis de los tiempos de remoción del mucílago de café.....	39
XV.	Análisis de los pesos de las muestras de café recién desmucilaginado, previo al proceso de presecado	40
XVI.	Análisis de los pesos de las muestras de café recién desmucilaginado, posterior al proceso de presecado	40
XVII.	Diferencia de los pesos promedio de las muestras de café recién desmucilaginado, previo y posterior al proceso de presecado	41
XVIII.	Análisis de los porcentajes de humedad de las muestras de café recién desmucilaginado, previo al proceso de presecado	42

XIX.	Análisis de los porcentajes de humedad de las muestras de café recién desmucilaginado, posterior al proceso de presecado.....	42
XX.	Diferencia de los porcentajes de humedad promedio de las muestras de café recién desmucilaginado, previo y posterior al proceso de presecado.....	43
XXI.	Análisis de los tiempos de presecado del café.....	43
XXII.	Diferencia de los pesos promedio de las muestras de café recién despulpado, previo y posterior al proceso de desmucilaginado de café	47
XXIII.	Diferencia de pH promedio de las muestras de café recién despulpado, previo y posterior al proceso de desmucilaginado de café	48
XXIV.	Tiempos promedio de remoción del mucílago de café	49
XXV.	Diferencia de los pesos promedio de las muestras de café recién desmucilaginado, previo y posterior al proceso de presecado de café	50
XXVI.	Diferencia de los porcentajes de humedad promedio de las muestras de café recién desmucilaginado, previo y posterior al proceso de presecado de café	51
XXVII.	Tiempos promedio de presecado de café	51

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
atm	Atmósferas
σ	Desviación estándar
F	F de Fisher
°C	Grados centígrados
°F	Grados Fahrenheit
g	Gramo
h	Hora
kg	Kilogramo
lb	Libras
\bar{x}	Media aritmética
m	Metro
mg	Miligramo
mL	Mililitro
mm	Milímetro
ppm	Partes por millón
ft³	Pies cúbicos
%	Porcentaje
pH	Potencial de hidrógeno

GLOSARIO

Agua miel	Aguas residuales obtenidas del procesamiento del café en beneficios.
Beneficio de café	Lugar donde se procesa el café, desde cerezo hasta oro.
Café cerezo	Grano de café recién cortado de la planta.
Café en oro	Grano de café ya secado y trillado, con un porcentaje de humedad inferior al 12 %.
Café oreado	Grano de café ya presecado, en el cual su humedad superficial ya fue eliminada.
Café pergamino	Grano de café despulpado, que todavía posee cascabillo.
Cascabillo de café	Cáscara interna del grano de café.
Criba	Máquina encargada de separar granos según el tamaño, de forma mecánica.
Desmucilaginado	Proceso de remoción del mucílago del café.
Despulpado	Proceso de remoción de la pulpa del café.

Enzima	Moléculas de naturaleza proteica que catalizan reacciones químicas.
Mucílago de café	Miel o gel que cubre el grano de café en pergamino.
Presecado	Proceso de remover la humedad superficial del grano de café por medio de secado al sol en patios.
Pulpa de café	Parte carnosa del café en cerezo, el cual se remueve por medio de pulperos.
Pulpero	Máquina encargada de despulpar el café cerezo de forma mecánica.
Sifón	Tanque para recepción del café cerezo.
Trillado	Proceso de remoción del cascabillo de café.
Trilladora	Máquina encargada de trillar el café.

RESUMEN

El presente estudio tiene como finalidad analizar la remoción del mucílago de café en el beneficio de Aguasanta (kilómetro 45,5 carretera a El Salvador, Fraijanes, Guatemala) asistido enzimáticamente, el cual consiste en la variación de la proporción de enzimas agregadas y la temperatura a la que se realizó el experimento, y el análisis de propiedades fisicoquímicas del café previo y posterior al proceso mismo de lavado. Además, se analizaron beneficios adicionales en el presecado en patio del café recién desmucilaginado y el efecto en sus propiedades físicas.

Para la realización del estudio se varió la concentración de enzimas en las muestras de café y se evaluó el tiempo de desmucilaginado necesario para obtener un café pergamino húmedo libre de mucílago, variando de igual forma la temperatura del proceso por medio de la realización del experimento a diferentes horarios (23:30, 00:30 y 01:30 horas), en días distintos, a una presión constante de 0,88 atm, respectiva del propio beneficio de café; además de las propiedades fisicoquímicas del café, previa y posterior a la desmucilaginación. Se analizaron los tiempos de presecado de café pergamino procesado por el método enzimático, y sus valores de peso y porcentaje de humedad, previa y posterior al proceso mismo.

De los resultados, se obtuvieron efectos positivos tanto en la etapa de desmucilaginado como en la de presecado de café. Ya que se obtuvo una remoción mayor de mucílago, en menor tiempo; y un presecado en patio más rápido debido a un menor contenido inicial de agua en el café.

OBJETIVOS

General

Evaluar la remoción de mucílago de café asistido enzimáticamente y sus efectos en el tiempo de desmucilaginado y presecado para la obtención de café pergamino seco.

Específicos

1. Evaluar el peso y el pH del grano de café, previa y posterior al proceso de desmucilaginación, variando la concentración de enzimas y la temperatura del proceso.
2. Determinar el tiempo de remoción del mucílago de café recién despulpado, variando la concentración de enzimas y la temperatura del proceso.
3. Evaluar el peso y el porcentaje de humedad del grano de café, previa y posterior al presecado, variando la concentración de enzimas en el desmucilaginado y la temperatura durante el proceso de presecado.
4. Determinar el tiempo de presecado del café recién desmucilaginado, variando la concentración de enzimas en el desmucilaginado y la temperatura durante el proceso de presecado.

HIPÓTESIS

Hipótesis científica

Es posible el asistimiento enzimático en el procesamiento del café, variando la concentración de enzimas, para obtener una mayor eficiencia en la remoción de mucílago del mismo.

Hipótesis estadísticas

- Hipótesis nulas
 - $(H_0)_1$: las medias de diferencia de peso del grano de café previo y posterior a la remoción del mucílago no varía significativamente en función a la concentración de enzimas y temperaturas aplicadas en la desmucilaginación.
 - $(H_0)_2$: las medias de tiempo para la remoción del mucílago de café no varían significativamente en función a la concentración de enzimas y temperatura aplicadas en la desmucilaginación.
 - $(H_0)_3$: las medias de diferencia de peso del grano de café previo y posterior al presecado no varía significativamente en función a la concentración de enzimas y temperatura aplicada en el presecado.

- $(H_i)_4$: las medias de diferencia de porcentaje de humedad del grano de café previo y posterior al presecado no varía significativamente en función a la concentración de enzimas y temperatura aplicada en el presecado.
- $(H_0)_5$: las medias de tiempo de presecado no varía significativamente en función a la concentración de enzimas y temperatura aplicada en el presecado.
- Hipótesis Alternativas
 - $(H_i)_1$: las medias de diferencia de peso del grano de café previo y posterior a la remoción del mucílago varía significativamente en función a la concentración de enzimas y temperaturas aplicadas en la desmucilaginación.
 - $(H_i)_2$: las medias de tiempo para la remoción del mucílago de café varían significativamente en función a la concentración de enzimas y temperatura aplicadas en la desmucilaginación.
 - $(H_i)_3$: las medias de diferencia de peso del grano de café previo y posterior al presecado varía significativamente en función a la concentración de enzimas y temperatura aplicada en el presecado.
 - $(H_i)_4$: las medias de diferencia de porcentaje de humedad del grano de café previo y posterior al presecado varía significativamente en función a la concentración de enzimas y temperatura aplicada en el presecado.

- (H_i)₅: las medias de tiempo de presecado varía significativamente en función a la concentración de enzimas y temperatura aplicada en el presecado.

INTRODUCCIÓN

En Guatemala, la industria del café es uno de los pilares de la economía guatemalteca, ya que, desde la década de 1850, ha sido uno de los productos de mayor exportación en el país. Por esta razón, la optimización del proceso en la obtención de café es tan importante, no solo para los cafetaleros, sino también para el país en sí. En la actualidad, hay maneras de optimizar y obtener una mayor eficiencia en la producción de café, y así mismo, obtener un café de mejor calidad. Una etapa muy importante en el procesamiento del café, es la obtención de café pergamino húmedo por medio de la remoción del mucílago del mismo grano recién despulpado. En Guatemala, los métodos de remoción de mucílago que mayormente se utilizan son: el método tradicional de fermentación natural y el método mecánico.

Basado en esto, y con la finalidad de optimizar el proceso de la remoción del mucílago de café, se decidió estudiar la factibilidad del método enzimático, en contraste con los métodos tradicional de fermentación natural y mecánico.

El objeto de la investigación partió en función a la creciente utilización de enzimas en las distintas industrias durante los últimos años, ya que estas actúan como aceleradores de reacciones químicas y degradación de compuestos. Lo cual las hace muy útiles en la industria cafetalera, para la remoción del mucílago de café. Ya que, por el método tradicional, la remoción de mucílago depende de las condiciones externas del clima, y en nuestro país la cosecha se da en los días más fríos del año; por lo tanto, en ciertas regiones del país el tiempo de desmucilaginado se alarga, mientras que, por el método enzimático, se puede agilizar la remoción del mucílago de café y así, obtener

tiempos más cortos. Por otro lado, el método mecánico remueve el mucílago de café por medio de desmucilagadoras mecánicas, realiza el proceso en una menor cantidad de tiempo; sin embargo, este no remueve el mucílago en su mayoría y tiende a dañar físicamente el grano de café, lo cual provoca un descenso en la calidad del mismo. Además, como valor agregado al método enzimático, se puede obtener un grano con menor cantidad de humedad, lo que promueve un presecado más rápido.

El propósito de la investigación será analizar el método enzimático para la remoción del mucílago de café; variando la proporción de enzima en las muestras de café y la temperatura, evaluando el tiempo necesario para obtener el café pergamino húmedo libre de mucílago, a presión atmosférica constante. Y evaluar el pH y el peso del café, previa y posterior a la desmucilaginación por el método enzimático. Además, se analizarán los tiempos de presecado de café pergamino procesado por el método enzimático y sus valores de peso y porcentaje de humedad previa y posterior al proceso de presecado.

1. ANTECEDENTES

En Guatemala, las enzimas para la industria del café han sido muy poco explotadas, por esta razón su utilización entre los cafetaleros es algo desconocido, a pesar de su accesibilidad.

El principal factor ha sido el desconocimiento de las mismas, ya que la mayoría de cafetaleros solo conocen y practican el método tradicional para la remoción del mucílago del café. Además, hay una escasa fuente de información sobre el estudio del uso de enzimas para la industria cafetalera. Entre los estudios realizados se encuentran:

En 2010, Edward Martínez; César Oliveros y Raimundo Sanz de Cenicafé, Colombia, realizaron un artículo científico titulado *Remoción del mucílago de café a través de fermentación natural*; la investigación tenía el objetivo de contribuir al conocimiento de algunos factores que afectan la fermentación del mucílago de café. Se evaluó la masa depositada en el tanque de fermentación, el efecto de la clasificación previa al despulpado, sobre el tiempo final de proceso y se determinó el comportamiento del pH y la temperatura de la masa.

En 1999, Carlos Puerta, de Cenicafé, Colombia, realizó el artículo científico titulado *Influencia del proceso de beneficio en la calidad de café*, en la investigación se evaluó la calidad de la bebida de café procesado mediante diferentes tipos y condiciones de beneficio: la fermentación natural, desmucilaginado mecánico, sin remoción de mucílago, lavado, sin lavado, secado inmediato, secado después de almacenamiento de café pergamino húmedo.

En 1982, Oscar Arunga, de la East African Industrial Research Organization, Kenya, realizó el artículo científico titulado *Coffee* dentro del libro titulado *Economic Microbiology*, la base de la investigación fue la fermentación del café y distintas metodologías para la remoción del mucílago del café pergamino, como la fermentación natural, enzimas comerciales, máquinas mecánicas desmucilagadoras y medios de remoción de mucilago. Además, se da una descripción acerca de la composición del mucílago y los cambios durante la fermentación del café.

En junio de 1980, Gabriel Ehlers, de la International Scientific Symposium on Coffee, en Londres (Inglaterra), realizó el artículo científico titulado *Posibles aplicaciones de enzimas en el procesamiento de café*, en esta investigación se estableció que el uso de enzimas microbiológicas para el procesamiento de café era muy limitado, pero las potenciales posibilidades eran numerosas. Como el uso de pectinas para la remoción del mucílago de café despulpado, la aplicación de galactomanasa para la producción de café instantáneo, la reducción de la viscosidad del extracto de café. En la investigación también se da una descripción de las características de la enzima.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Origen del café

Los orígenes del café provienen de África, principalmente Etiopía. Este cultivo lo constituyen por más de 100 especies; se conoce como el género *Coffea*. Los distintos tipos de café fueron desarrollados según las condiciones climatológicas y geográficas de su origen; aporta distinta genética y características físicas específicas y organolépticas a cada una de esas variedades. Existen dos variedades principales que son comercializadas a nivel mundial: arábica, nativa de Etiopía, que representa al 60 % del mercado internacional; y robusta, nativa del centro y oeste de África, que representa el 40 % del mercado internacional. En América Latina, la variedad más prominente es la arábica.

Figura 1. Tipos de café: arábica y robusta



Fuente: 10 *Differences between robusta & arabica coffee.*

<https://theroasterspack.com/blogs/news/15409365-10-differences-between-robusta-arabica-coffee>. Consulta: 20 de septiembre de 2018.

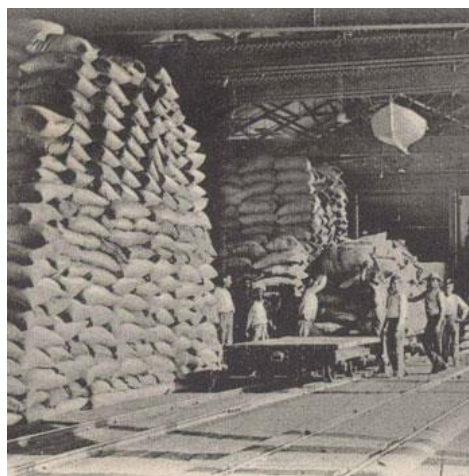
2.2. Historia del café en Guatemala

La historia del café en Guatemala, se remonta a los siglos XV y XVI, cuando las primeras plantas de café fueron traídas por españoles religiosos, a partir de la conquista. La mayor parte de las plantaciones se cultivaban en los jardines de los conventos de Santiago de los Caballeros.

Sin embargo, luego del terremoto de 1773 las plantaciones que sobrevivieron se trasladaron a la nueva capital.

No obstante, la industria del café en el país comenzó a desarrollarse entre los años 1850 y 1860, debido a la expansión de las plantaciones hacia otras regiones, tales como el suroeste del país. Al inicio, el crecimiento fue lento debido a la novedad del cultivo, inexperiencia con el trato del mismo y a la falta de tecnología.

Figura 2. **Café para exportar, muelle de San José, 1910**



Fuente: Anacafé. *Café exportado*, 110. <https://www.anacafe.org/>. Consulta: 21 de septiembre de 2018.

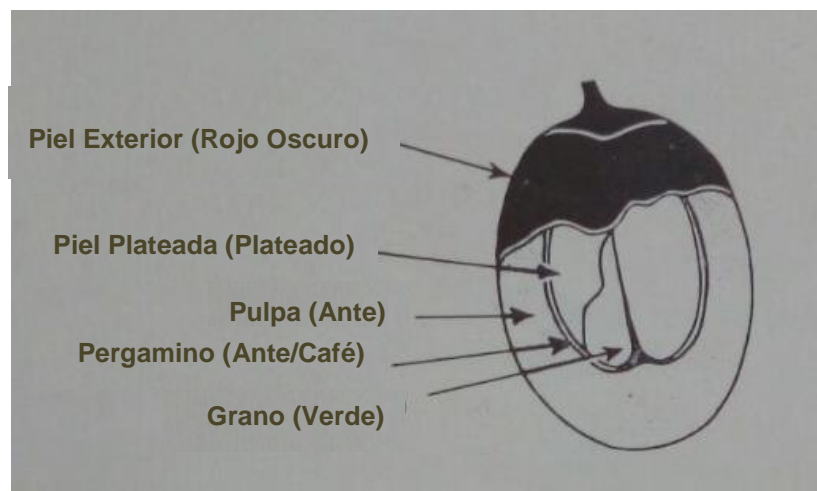
La falta de mano de obra también tomó un rol muy importante en el atraso del desarrollo de la misma industria, ya que la producción era limitada. Sin embargo, a pesar de las circunstancias, las plantaciones crecieron y para el año 1902 los cultivos más importantes se encontraban en la costa sur.

Las principales características que permitieron a Guatemala convertirse en uno de los principales productores de café y que llegara a ser uno de los pilares de la economía del mismo, fue el aislamiento natural, el clima templado y el suelo fértil.

2.3. Caracterización del grano de café

A continuación, se muestra la caracterización del grano de café.

Figura 3. Partes del café en cerezo



Fuente: Coffee Processing Technology. *Partes del café cerezo.*

https://www.google.com/search?q=Coffee+Processing+Technology&rlz=1C1SQJL_esGT842GT842&oq=Coffee+Processing+Technology&aqs=chrome.69i57j0l5.555j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8. Consulta: 22 de septiembre de 2018.

Tabla I. **Densidades del café en varias etapas del procesamiento**

Cereza fresca de café	44,0 lb/ ft ³
Cereza seca de café (secado solar)	26,0 lb/ ft ³
Pergamino húmedo	45,5 lb/ ft ³
Pergamino seco	25,0 lb/ ft ³
Grano seco, descascarado y pulido	47,5 lb/ ft ³

Fuente: Coffee Processing Technology. *Densidad del café.*

https://www.google.com/search?q=Coffee+Processing+Technology&rlz=1C1SQJL_esGT842GT842&oq=Coffee+Processing+Technology&aqs=chrome.69i57j0l5.555j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8. Consulta: 22 de septiembre de 2018.

2.4. Enzimas

A continuación, se describe la enzima.

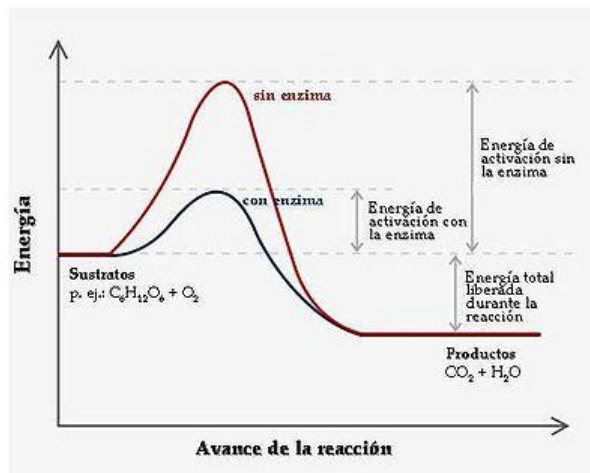
2.4.1. Generalidades

Las enzimas son moléculas de naturaleza proteica que catalizan reacciones químicas, siempre que sean termodinámicamente posibles: una enzima hace que una reacción química que es energéticamente posible, pero que transcurre a una velocidad muy baja, sea cinéticamente favorable, es decir, transcurra a mayor velocidad que sin la presencia de la enzima. En estas reacciones, las enzimas actúan sobre unas moléculas denominadas sustratos, las cuales se convierten en moléculas diferentes denominadas productos. Casi todos los procesos en las células necesitan enzimas para que ocurran a unas tasas significativas. A las reacciones mediadas por enzimas se les denomina reacciones enzimáticas.

Debido a que las enzimas son extremadamente selectivas con sus sustratos y su velocidad crece solo con algunas reacciones, el conjunto (set) de enzimas presentes en una célula determina el tipo de metabolismo que tiene esa célula. A su vez, esta presencia depende de la regulación de la expresión génica correspondiente a la enzima.

Como todos los catalizadores, las enzimas funcionan disminuyendo la energía de activación de una reacción, de forma que la presencia de la enzima acelera sustancialmente la tasa de reacción. Las enzimas no alteran el balance energético de las reacciones en que intervienen ni modifican, por lo tanto, el equilibrio de la reacción, pero consiguen acelerar el proceso incluso en escalas de millones de veces. Una reacción que se produce bajo el control de una enzima, o de un catalizador en general, alcanza el equilibrio mucho más deprisa que la correspondiente reacción no catalizada.

Figura 4. **Cinética enzimática**



Fuente: Wikipedia.org. *Cinética enzimática*.

https://es.wikipedia.org/wiki/Cin%C3%A9tica_enzim%C3%A1tica. Consulta: 22 de septiembre de 2018.

Al igual que ocurre con otros catalizadores, las enzimas no son consumidas en las reacciones que catalizan ni alteran su equilibrio químico. Sin embargo, las enzimas difieren de otros catalizadores por ser más específicas. La gran diversidad de enzimas existentes cataliza alrededor de 4 000 reacciones bioquímicas distintas. No todos los catalizadores bioquímicos son proteínas, pues algunas moléculas de ARN son capaces de catalizar reacciones (como la subunidad 16S de los ribosomas en la que reside la actividad peptidil transferasa). También, cabe nombrar unas moléculas sintéticas denominadas enzimas artificiales capaces de catalizar reacciones químicas como las enzimas clásicas.

La actividad de las enzimas puede ser afectada por otras moléculas. Los inhibidores enzimáticos son moléculas que disminuyen o impiden la actividad de las enzimas, mientras que los activadores son moléculas que incrementan dicha actividad. Asimismo, gran cantidad de enzimas requieren de cofactores para su actividad. Muchas drogas o fármacos son moléculas inhibidoras. Igualmente, la actividad es afectada por la temperatura, el pH, la concentración de la propia enzima y del sustrato, y otros factores físicoquímicos.

Muchas enzimas son usadas comercialmente, por ejemplo, en la síntesis de antibióticos o de productos domésticos de limpieza. Además, son ampliamente utilizadas en diversos procesos industriales, como son la fabricación de alimentos, destinción de vaqueros o producción de biocombustibles.

2.4.2. Enzimas para la remoción del mucílago de café

Para la remoción del mucílago se utiliza una combinación de enzimas producidas por la fermentación controlada de las cepas *Aspergillus niger* o bien

por la *Trichoderma longibrachiatum*, las cuales producen como principal producto la pectinasa; estas también productoras de celulasa y beta-glucanasa como enzimas secundarias. Esto permite que esta combinación de enzimas tenga la capacidad de depolimerizar las pectinas esterificadas, fibras y otros polímeros naturales provenientes de la pulpa y mucílago del café. Los rangos óptimos de temperatura y pH para esta combinación de enzimas son entre 40 °C y 57 °C, y un pH entre 4,2 y 6,5.

2.4.3. Pectinasa

Estas enzimas causan la degradación de las cadenas de pectina. Ellas son producidas por fermentación controlada de cepas seleccionadas de *Aspergillus niger*. Las pectinasas poseen varias aplicaciones en diversas industrias. La industria que más se ha beneficiado con ellas es la alimentaria. El uso más antiguo y aún hoy más difundido es en la optimización de los procesos de filtración y clarificación de jugos. En la industria del vino, las pectinasas se utilizan para aclarar los mostos y actualmente en las industrias cafetaleras para la remoción del mucílago de café.

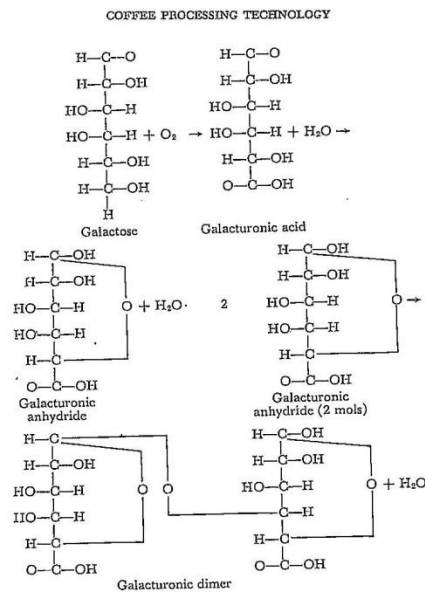
2.5. Química de la fermentación en el café

La conocida química de la fermentación del mucílago de café es compleja, por lo tanto, solo las reacciones principales se tomaron en cuenta. El mucílago de café, el mesocarpo del fruto, contiene alrededor de 85 % de agua libre y 15 % de sólidos en forma de un insoluble hidrogel coloidal sin una estructura celular al momento de la madurez del fruto. Los sólidos consisten en un 80 % de ácidos pectínicos (12 % del mucílago) y 20 % de azúcares (3 % del mucílago). Los ácidos pectínicos están compuestos de cadenas lineales polimerizadas de ácidos formados principalmente por azúcares de hexosa

hidroxilo, principalmente, galactosa con un poco de arabinosa y otros azúcares. Ésteres de estos ácidos y cadenas de ácidos también son formados.

Los ácidos pectínicos son clasificados como protopectinas (peso molecular alto), pectinas, y ácido péctico (peso molecular bajo). Durante el desarrollo de la fruta, el ácido carboxílico es formado por azúcar (alcohol) al oxidarse. El ácido anhídrido es formado por la pérdida de una molécula de agua, luego dos moléculas anhídridas forman un dímero al liberar otra molécula de agua. El trímero es formado por una reacción similar, y así continua hasta que muchos cientos de moléculas anhídridas se combinan para realizar una cadena de protopectina.

Figura 5. **Reacciones principales en la remoción del mucílago de café**



Fuente: Coffee Processing Technology. *Reacciones de la remoción del mucílago del café.*

https://www.google.com/search?q=Coffee+Processing+Technology&rlz=1C1SQJL_esGT842GT842&oq=Coffee+Processing+Technology&aqs=chrome.69i57j0l5.555j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8

UTF-8. Consulta: 22 de septiembre de 2018.

Además de ácidos pectínicos y azúcares, muchas enzimas son formadas en el mucílago y en los alrededores de la pulpa conforme el fruto se desarrolla. Estas son protopectinasa, pectinasa, pectinesterasa, y pectasa. Si el fruto no es cosechado, sino que más bien se mantiene intacto hasta su caída de la planta y finalmente se seca, estas enzimas causan la fermentación del mucílago hasta que es descompuesto en sus componentes más simples que lo forman, cada enzima actuando específicamente con el compuesto que indica su nombre. Esto toma lugar entre la piel hasta que el mucílago desaparece por sí solo. Ha sido transformado desde una hidrogel hasta una condición de hidrosol. El mucílago digerido se convierte en material alimenticio para el metabolismo de la semilla o el grano.

Las enzimas rompen las moléculas grandes por medio del rompimiento de los enlaces polimerizados, gradualmente produciendo cadenas más cortas hasta los ácidos monomoleculares simples y ésteres restantes.

Si el fruto es despulpado, muchos de los mismos cambios se mantienen, pero, en este caso, los granos están expuestos al acceso de una diversidad de microorganismos como levaduras, mohos, hongos, y bacterias donde encuentran un medio favorable para su crecimiento. En su desarrollo, estos producen sus propias enzimas, las cuales, cuando los organismos llegan a ser significativamente numerosos, actúan sobre el mucílago de café.

La secuencia usual es que las levaduras encuentran condiciones favorables y producen una fermentación alcohólica de los azúcares presentes. Entonces, las bacterias, usando los alcoholes como material alimenticio, forman ácido acético, láctico, butírico y carboxílico por medio de fermentaciones oxidativas. Cuando el ácido butírico empieza a formarse, es cuando la calidad del café empieza a sufrir. Las bacterias, mohos, hongos, dependiendo de la

naturaleza de los mismos, pueden llegar a producir sabores y aromas desagradables, cuando la fermentación del café se prolonga demasiado.

2.6. Etapas del procesamiento de café

A continuación, se muestran las etapas del procesamiento de café.

2.6.1. Recolección del café

La etapa de la recolección consiste en la recolección de los frutos maduros de la planta de café, la característica principal para la identificación de estos es su color rojizo brillante y su textura suave. En la etapa de la recolección se realizan distintos cortes; primeramente, se cortan solo los frutos maduros, y conforme se acerca al final de la cosecha, ya se corta todo el restante de frutos que no llegaron o sobrepasaron el punto óptimo de madurez.

En todo caso, se mezclen estos distintos tipos de frutos, que es un café de una menor calidad o estos ya bien, se separan y se trabajan por aparte, según el mercado que posean. Uno de los principales factores para esta etapa, es la lluvia, ya que la falta de esta puede hacer la madurez del fruto sea más rápida, o bien, el exceso, prolonga la etapa de madurez y puede ocasionar daño a la planta misma.

Figura 6. **Recolección del café, Tenerife, España**



Fuente: *Recolección de café, lecci.*

<https://pdfs.semanticscholar.org/b812/f2d12ce29f1f1db5a74669633bddaac0b812.pdf>. Consulta:
22 de septiembre de 2018.

2.6.2. Recepción del café

Esta etapa consiste en la recepción del fruto mismo para su procesamiento en el beneficio de café. En la mayoría de beneficios de café se recibe solamente fruto maduro y en buenas condiciones; sin embargo, en los beneficiados más grandes tienen la capacidad de recibir café de menor calidad para su procesamiento en otra línea de producción que no tenga contacto con el café de mayor calidad. La recepción del café en los beneficios de Guatemala se hace principalmente por peso, ya que esto facilita la estimación de su costo; sin embargo, hay casos donde se recibe por volumen. Los recibidores principales del país son los sifones tradicionales, los cuales son principalmente de fondo cónico o piramidal invertida y el transporte del café a partir del sifón es por medio de agua.

Figura 7. **Sifón vertical, recepción de café**



Fuente: elaboración propia.

2.6.3. Primera clasificación

En esta primera clasificación el café depositado en el sifón es transportado por medio de una bomba y agua a un tanque vertical con fondo cónico donde se realiza la separación del café de primera y segunda calidad, y las natas. Donde el café más denso el cual es de primera calidad, se hunde al fondo cónico y es transportado a una línea de producción; los de segunda calidad son transportados de la parte superior del tanque y las natas son todo lo que flota y no tiene mayor valor comercial.

Figura 8. **Tanque vertical de fondo cónico, primera clasificación**



Fuente: elaboración propia.

2.6.4. Despulpado del café

En esta etapa se separa el grano de café del resto del fruto, solamente removiendo su pulpa. En los beneficios de café más grandes poseen varias líneas de recirculación de despulpe con despulpadoras, con el fin de despulpar la mayor cantidad de granos posibles y desechar los granos defectuosos que pudieron haber pasado por la primera clasificación. Esta etapa es totalmente mecánica, por lo tanto, es necesaria la calibración eventual de los equipos y el tratamiento de granos con las mismas características físicas para evitar daño en el mismo. También, es importante resaltar que en el despulpado con beneficios húmedos es ideal utilizar la recirculación de agua de manera que se reduzca la contaminación y la sobreutilización del agua.

Aproximadamente el 40 % es lo que representa el peso de la pulpa en un fruto, por lo que es el subproducto más voluminoso del beneficiado. La densidad aparente de la pulpa fresca y suelta es de aproximadamente 249 kg por metro cúbico, de manera que de cada 4 535 kg de café maduro se producirán 1 814 kg de pulpa, que ocupan aproximadamente 7 metros cúbicos. Este material se compacta y después de 24 horas la densidad es de 453 kg por metro cúbico. Por esta razón es que se toman procesos para la pulpa como desecho, esta se procesa para elaborar abono orgánico que se utiliza en almácigos o en plantas luego de la cosecha.

Figura 9. **Pulperos, despulpado del café**



Fuente: elaboración propia.

2.6.5. Segunda clasificación

Esta clasificación consiste en la clasificación de los granos según su tamaño con el fin de trabajar por lotes uniformes, siendo los granos más grandes de mejor apreciación comercial. Se utilizan equipos llamados cribas giratorias, las cuales separan los granos por medio de agujeros que poseen

dentro de la misma, donde los granos de café se transportan perpendicularmente. Además, aquí se eliminan los sobrantes de pulpa o cerezos sobrantes de la primera clasificación; se evita así efectos en la apariencia y en una fermentación dispareja.

Figura 10. **Cribas giratorias, segunda clasificación**



Fuente: elaboración propia.

2.6.6. Remoción del mucílago de café

A continuación, se muestra la remoción del mucílago de café.

2.6.6.1. Caracterización del mucílago y su remoción

Entre el 15,5 y el 22 % es lo que representa el mucílago en peso en un fruto de café regular. La composición química del mucílago es 33 % de materias

pécticas totales, 30 % de azúcares reductores, 20 % de azúcares no reductores y 17 % de celulosas cenizas y otros componentes. Además, estos componentes generan entre 5,6 y 6,0 de pH. El mucílago se debe retirar de la parte superficial del grano para procesarlo. Y por ser un material insoluble, se debe solubilizar para que sea un proceso más sencillo.

El mucílago se puede degradar a través de una fermentación natural, y este proceso es el más utilizado en los beneficios húmedos de café. Este método es bioquímico y se realiza en tanques de fermentación que su tamaño depende de la cantidad de producción diaria de la finca. El tiempo que el producto se mantiene en estos tanques para la fermentación dependen de las características climáticas del área, ya que la temperatura incide directamente sobre el tiempo. Regularmente es los periodos van desde 6 a 48 horas.

El tiempo en que el producto se encuentra a punto se puede medir introduciendo un palo rollizo en diferentes partes del producto, si al sacarlo los granos tapan el orificio todavía falta tiempo. Si al sacar el palo queda el orificio abierto, se muestrea diferentes partes del producto, se lava y luego se frota. Si este tiene una textura áspera, el producto se encuentra listo para el lavado. Hasta ahora no se ha encontrado un ensayo físico o químico que resulte práctico para determinar este punto de fermento. Aparentemente, la medida del pH resultaría adecuada si se trabaja con masas que se pudieran homogenizar fácilmente.

En general, puede decirse que cuando la masa de café en fermentación baja a pH 4, puede considerarse a punto de fermento. Otra parte muy importante para tener una producción uniforme y de alta calidad es el lavar las pilas de fermentación luego de utilizarlas para evitar granos rezagados que pueden llegar a contaminar los consecuentes productos.

2.6.6.2. Métodos para la remoción de mucílago

A continuación, se muestran los métodos para la remoción de mucílago.

2.6.6.2.1. Fermentación natural

Este es el famoso, tradicional y simple proceso que ha sido utilizado desde que el café ha sido despulpado desde su primera vez, ha sido el método que ha estado vigente desde al menos 200 años y es el usado por el 90-95 % de los beneficiados húmedos del país.

El café recién despulpado es colocado sobre tanques de concreto, o en otras ocasiones en tanques de madera. El agua que transporta los granos de café a los tanques es drenada, y el café es retenido hasta que el mucílago sea dispersable y fácil de eliminar.

Las enzimas naturales propias del mismo mucílago se encargan de la digestión al inicio; luego, levaduras y bacterias de las paredes del tanque, agua miel utilizada y de la superficie exterior de la piel del fruto empiezan a crecer en cantidades lo suficientemente grandes para formar enzimas pécticas similares que continúan con el proceso de digestión del mucílago.

En el caso que el café despulpado ha estado el suficiente tiempo para que el mucílago este totalmente dispersable, es necesario lavarlo de inmediato, ya que, la excesiva cantidad de microorganismos podrían afectar el sabor del café, dándole sabores indeseables. El tiempo promedio de la digestión es alrededor de 36 horas, dependiendo de las condiciones del proceso.

Figura 11. **Pilas para fermentado del café y remoción del mucílago**



Fuente: elaboración propia.

2.6.6.2.2. Enzimático

Con el fin de acelerar la digestión o remoción del mucílago, ha sido muy beneficioso el uso de pequeñas cantidades de enzimas pecticas que contienen como principales componentes activos la pectasa, protopectina, pectinasa y pectinesterasa. Este producto es producido y es cuidadosamente estandarizado y manufacturado por empresas como Specialty Enzymes. En altas dosis, estas son capaces de digerir el mucílago en cuestión de 5 minutos; sin embargo, este proceso no es económico. Usado en pequeñas cantidades y a temperaturas ambiente, estas digieren el mucílago de café entre 5 y 8 horas a un precio bajo.

En la práctica, el café cerezo es despulpado al final del día, y las enzimas son mezcladas con el café despulpado y es posible la remoción del mucílago durante el transcurso de la noche. Y es lavado por la mañana y listo para secar.

De esta forma, el tiempo de digestión es acortado, y esto tiende a aumentar la calidad del café, eliminando fermentaciones indeseables, y permite el mantener los horarios de producción regular y reducir grandemente la capacidad requerida y costo de tanques de fermentación. El acortamiento en el tiempo desde 36 horas a 8 horas significa que es requerido una mucha menor capacidad en los tanques de fermentación.

Figura 12. **Remoción del mucílago de café, enzimáticamente**



Fuente: *Remoción del mucílago de café, enzimáticamente*. <https://www.fundesyram.info/>.
Consulta: 23 de septiembre de 2018.

2.6.6.2.3. Mecánico

Algunas máquinas han sido diseñadas para desprender el mucílago del café despulpado por roce o frotado. En un tipo de máquina, los granos de café despulpado son presionados unos contra otros y contra un revestimiento duro de la máquina mientras son transportados a través de la misma por un tornillo con resistencia generada parcialmente por una descarga regulada. Los espacios son ajustados cuidadosamente para que la capa pergamino del café no sea triturada ni se rompa, y las esquinas de las salientes son redondas para evitar cortar el grano. Debido a que el espaciado exacto es crítico, los granos de

diferentes tamaños causan dificultad en el proceso, ya que los más grandes podrían salir dañados y los muy pequeños podrían escapar a través del tratamiento.

Figura 13. **Remoción del mucílago de café, mecánicamente**



Fuente: *Remoción del mucílago de café*. http://www.ico.org/ES/field_processingc.asp. Consulta 23 de septiembre de 2018.

2.6.7. Lavado del café

El lavado es la etapa del proceso de beneficiado en donde se remueve la miel que se encuentra adherida al grano, esta se puede quitar por dos tipos de lavado: método manual y mecánico. En el método manual se realiza a través de inmersión y correteo en un canal de agua con la utilización de paletas. Para este método la mano de obra a utilizar es mucho mayor al lavado mecánico, al igual que el tiempo. Por otro lado, el lavado mecánico utiliza bombas de sólidos y canales rectos con una pendiente uniforme de 0,75 %, se trata de dar al canal

un flujo laminar constante que permita la clasificación del café recién lavado. Para este proceso se debe utilizar agua limpia.

2.6.8. Secado del café

Esta etapa consiste en reducir la humedad del café a un rango entre 10 % y 12 %, con el fin de llegar al punto donde la reproducción bacteriana en el mismo sea casi nula y así tener la calidad de exportación necesario para su futuro tostado y molido según sea el caso.

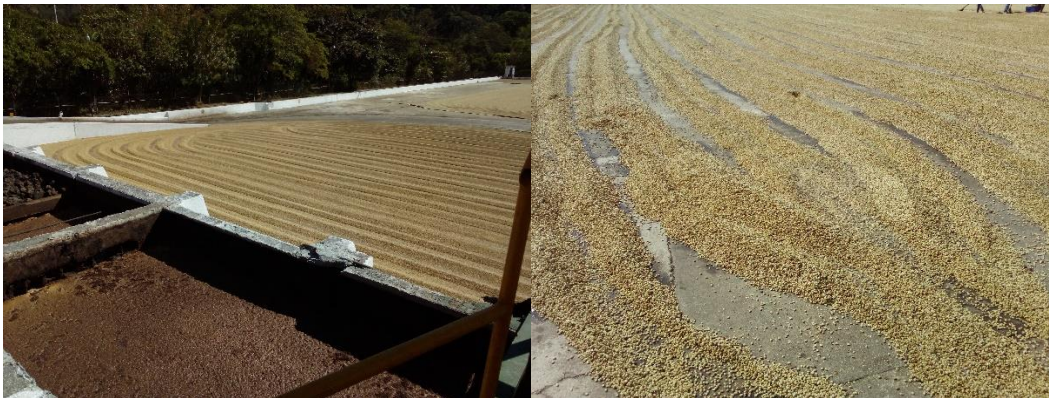
Para medir el porcentaje de humedad se pueden utilizar muchos métodos, entre ellos la medición de características físicas como la dureza y color, estas siendo en ocasiones medidas de forma empírica o se utiliza un medidor de humedad específico para café, ya que el café por estar en forma de pergamino, incluyendo cascabillo, es algo inseguro utilizar un medidor de humedad general para granos.

El secado del café se puede realizarse dos formas distintas, la primera es natural en patios, a través de energía solar y viento mismo de la región. En este método los costos son más bajos, pero se necesita tener suficiente área para estos. Estos patios deben tener ciertas características como una pendiente máxima de 2 %, evitar colocar el café apilado con una altura muy grande, evitar contaminación externa y voltear el café regularmente para el secado uniforme del mismo.

Sin embargo, por este método los tiempos se extienden por encima de 8 días ocasionalmente para llegar al rango de humedad aceptable, por lo tanto, solo es aplicable hasta una cierta limitante de producción y espacio de patio. El otro método consiste en el secado del café de forma mecánica por medio de

equipos llamados guardiolas. Por lo general, en los beneficiados de café se utiliza la combinación de ambos métodos, con el fin de eficientar el proceso y reducir costos, se deja secar el café en patios hasta llegar al punto de estar oreado, lo que significa que físicamente al tacto ya está totalmente escurrido, y luego de oreado ya se transportan a las guardiolas para llegar al rango de porcentaje de humedad correcto.

Figura 14. **Secado del café en patio, presecado**



Fuente: Beneficio de Café de Aguasanta

2.6.9. Trillado y almacenamiento del café

En esta etapa se aprovecha a trillar el café por medio de trilladoras especiales para la remoción del cascabillo, esta etapa se puede realizar solamente si el café pergamino oreado y secado ya se encuentra en el porcentaje de humedad correcto, ya que, si esta humedad es muy alta, no es posible remover el cascabillo por medio de la trilladora, y es muy probable que se dañe la integridad del grano de café.

Luego, este se almacena para la posible exportación del mismo, dependiendo de las características del área, variación en el precio y demanda del producto. Las instalaciones para el almacenamiento del café dependen mucho del tipo de beneficio de café, ya que pueden variar desde sacos, hasta silos verticales. Donde su objetivo es mantener la calidad y la cantidad del producto clasificado de la manera correcta, basándose en mantenerlo alejado de daños por factores climáticos, fitopatógenos, insectos y de malos olores que el producto pueda adquirir. En Guatemala, se suele almacenar en sacos, ya que es una práctica de hace muchos años, donde luego se transportan a bodegas; sin embargo, en beneficios de café grandes, se suele almacenar en silos cuando hay sobreproducción.

Figura 15. **Almacenamiento del café en sacos**



Fuente: elaboración propia.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

A continuación, se presentan las variables del café.

- Variables dependientes
 - Tiempo (h)
 - Porcentaje de humedad (%)
 - Peso (kg)

- Variables independientes
 - Temperatura (°C)
 - Concentración (mg de enzimas / kg de café)
 - pH

3.2. Delimitación del campo de estudio

- Área: agroalimenticia.

- Industria: café.

- Proceso: evaluación de la remoción de mucílago de café, por medio de asistimiento enzimático, y sus efectos en el tiempo de desmucilaginado y presecado para la obtención de café pergamino seco.

- Ubicación: el estudio y su análisis se realizarán en el beneficio de café Aguasanta, ubicado en el kilómetro 45,5 carretera a El Salvador, Fraijanes, Guatemala.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Br. Carlos Mauricio Menchú Alvarez.
- Asesor: Ing. Qco. Hans Marroquín Lang.
- Expertos (gerente general y trabajadores del beneficio de café de Agua Santa): César Arrécis, Manuel, Rolando y Pedro.
- Ayudantes (compañeros de la Facultad de Ingeniería Química): Sergio Patzán, Pedro Raguex, Vallery Carrera, Miguel Contreras y Julio Villacinda.

3.4. Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos)

- Equipo
 - Balanza electrónica
 - Horno de convección
 - Medidor de pH
 - Termómetro de etanol

- Cristalería
 - Beakers
 - 50 mL
 - 100 mL
 - 500 mL
 - 1000 mL
 - Probetas
 - 10 mL
 - 1000 mL
 - Material de agitación
 - Varas de madera para mezclado
 - Recipientes plásticos de almacenaje para muestras
 - 5 galones
 - Reactivos y materia prima
 - Agua
 - Café recién despulpado
 - Enzimas para la remoción del mucílago de café

3.5. Técnica cuantitativa o cualitativa

La investigación estará basada en las técnicas cuantitativa y cualitativa, ya que el experimento va a estar influenciado por variables independientes y dependientes con valores numéricos; sin embargo, también se necesitará la técnica cualitativa utilizada entre los trabajadores para determinar si el café llegó a punto, en la remoción del mucílago.

- Remoción del mucílago del café
 - Obtener las muestras de 10 kg de café recién despulpado.
 - Anotar la hora inicial de la etapa de desmucilaginado.
 - Medir la temperatura inicial de la etapa de desmucilaginado, y cada 30 minutos hasta terminar con el procedimiento.
 - Medir el pH de las muestras de café recién despulpado.
 - Preparar las soluciones de 10, 100 y 400 ppm de enzimas a utilizar para cada muestra de café recién despulpado.
 - Mezclar la solución de enzima con la muestra de café.
 - Agitar y dejar escurrir.
 - Medir el tiempo de remoción de mucílago de la muestra testigo y las muestras con enzimas, hasta llegar a punto.

- Anotar la hora final de la etapa de desmucilaginado.
- Lavar las muestras con agua limpia y dejar escurrir.
- Medir el pH de la muestra de café recién desmucilaginado.
- Pesar la muestra de café recién desmucilaginado.
- Presecado del café pergamino
 - Anotar la hora inicial del proceso.
 - Medir la temperatura inicial de la etapa de presecado, y cada 30 minutos hasta terminar el procedimiento.
 - Dejar reposar las muestras al sol, volteándolo cada 30 minutos, hasta que llegue a punto.
 - Anotar la hora final de la etapa de presecado.
 - Pesar las muestras de café recién presecado.
- Secado de café para determinación de los porcentajes de humedad en las etapas del desmucilaginado y el presecado del café en pergamino
 - Pesar una pequeña porción de las muestras de café oreadas obtenidas de la etapa de presecado.
 - Secarlas en el horno de conexión hasta obtener la base seca.

- Determinar los porcentajes de humedad de las muestras de café obtenidos del presecado.
- A partir del peso de las muestras de la etapa de desmucilaginado y de presecado, obtener la relación, y determinar el porcentaje de humedad respectivo de las muestras de la etapa de desmucilaginado.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

A continuación, se muestra la recolección y ordenamiento de la información.

Tabla II. **Medición del peso y pH de la muestra de café recién despulpado previos al proceso de desmucilaginado de café**

Temperatura ambiental promedio (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Previo a la remoción					
		Peso de la muestra (kg)			pH de la muestra		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3
14,56	0	10,00	10,00	10,00	4,80	4,76	4,90
	10	10,00	10,00	10,00	4,01	3,95	3,96
	100	10,00	10,00	10,00	4,18	4,18	4,17
	400	10,00	10,00	10,00	4,49	4,46	4,47
15,37	0	10,00	10,00	10,00	5,24	5,18	5,15
	10	10,00	10,00	10,00	4,14	4,04	4,06
	100	10,00	10,00	10,00	4,03	4,08	4,05
	400	10,00	10,00	10,00	3,96	3,94	3,97
19,15	0	10,00	10,00	10,00	4,29	4,27	4,33
	10	10,00	10,00	10,00	4,95	5,08	5,07
	100	10,00	10,00	10,00	4,63	4,60	4,65
	400	10,00	10,00	10,00	4,45	4,37	4,37

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Medición del peso y pH de la muestra de café recién despulpado posterior al proceso de desmucilaginado de café**

Temperatura ambiental promedio (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Posterior a la remoción					
		Peso de la muestra (kg)			pH de la muestra		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3
14,56	0	9,10	8,97	9,00	5,76	5,77	5,92
	10	8,93	8,92	8,79	4,18	4,15	4,17
	100	8,72	8,76	8,62	4,43	4,49	4,42
	400	8,38	8,31	8,37	4,57	4,58	4,49
15,37	0	9,16	9,28	9,31	5,84	5,80	5,60
	10	9,15	9,21	9,24	4,64	4,63	4,70
	100	8,89	8,81	8,87	4,48	4,45	4,50
	400	8,52	8,36	8,31	4,26	4,47	4,62
19,15	0	9,50	9,62	9,45	5,85	5,93	5,94
	10	9,06	8,98	9,02	5,97	6,02	5,94
	100	8,67	8,75	8,78	5,66	5,72	5,73
	400	8,36	8,35	8,27	5,22	5,18	5,80

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Medición de los tiempos de remoción del mucílago de café**

Temperatura ambiental promedio (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Tiempo de remoción (h)		
		R1	R2	R3
14,56	0	7,0	7,0	7,0
	10	6,5	6,5	6,5
	100	6,0	6,0	6,0
	400	5,5	5,5	5,5
15,37	0	7,0	7,0	7,0
	10	6,0	6,0	6,0
	100	6,0	6,0	6,0
	400	5,5	5,5	5,5
19,15	0	7,0	7,0	7,0
	10	6,0	6,0	6,0
	100	6,0	6,0	6,0
	400	5,5	5,5	5,5

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Medición del peso y porcentaje de humedad de la muestra de café recién desmucilaginado previos al proceso de presecado de café**

Temperatura ambiental promedio (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Previo al presecado					
		Peso de la muestra (kg)			Porcentaje de humedad de la muestra (%)		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3
24,49	0	9,50	9,62	9,45	59,12	59,43	59,68
	10	9,06	8,98	9,02	57,47	57,65	58,17
	100	8,67	8,75	8,78	56,84	57,18	57,57
	400	8,36	8,35	8,27	54,80	54,64	53,72
25,81	0	9,10	8,97	9,00	58,97	58,33	56,95
	10	8,93	8,92	8,79	56,16	60,82	57,89
	100	8,72	8,76	8,62	55,97	56,33	58,72
	400	8,38	8,31	8,37	56,09	56,21	55,17
26,53	0	9,16	9,28	9,31	55,96	57,61	57,51
	10	9,15	9,21	9,24	58,03	59,27	56,66
	100	8,89	8,81	8,87	57,50	55,54	57,04
	400	8,52	8,36	8,31	55,76	56,21	55,09

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Medición del peso y porcentaje de humedad de la muestra de café recién desmucilaginado posterior al proceso de presecado de café**

Temperatura ambiental promedio (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Posterior al presecado					
		Peso de la muestra (kg)			Porcentaje de humedad de la muestra (%)		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3
24,49	0	7,03	7,06	7,01	44,72	44,71	45,68
	10	6,87	6,85	6,94	43,90	44,48	45,63
	100	6,74	6,80	6,86	44,51	44,90	45,70
	400	6,68	6,71	6,65	43,43	43,51	42,41
25,81	0	6,87	6,96	7,02	45,68	46,28	44,84
	10	7,01	6,72	6,65	44,15	47,95	44,37
	100	6,98	6,96	6,82	45,00	45,06	47,86
	400	6,71	6,57	6,81	45,17	44,60	44,90
26,53	0	7,23	7,25	7,22	44,23	45,74	45,17
	10	6,91	6,90	6,85	44,45	45,59	41,58
	100	6,77	6,79	6,75	44,19	42,30	43,50
	400	6,70	6,64	6,50	43,73	44,86	42,55

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Medición de los tiempos de presecado de café**

Temperatura ambiental promedio (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Tiempo de presecado (h)		
		R1	R2	R3
24,49	0	6,0	6,0	6,0
	10	5,5	5,5	5,5
	100	5,5	5,5	5,5
	400	5,5	5,5	5,5
25,81	0	6,0	6,0	6,0
	10	5,5	5,5	5,5
	100	5,5	5,5	5,5
	400	5,5	5,5	5,5
26,53	0	5,5	5,5	5,5
	10	4,5	4,5	4,5
	100	4,5	4,5	4,5
	400	4,5	4,5	4,5

Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

A continuación, se muestra la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.

Tabla VIII. **Análisis de los pesos de las muestras de café recién despulpado, previo al proceso de desmucilaginado de café**

Temperatura ambiental (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Peso de la muestra (kg)				
		R1	R2	R3	\bar{x}	σ
14,56	0	10,00	10,00	10,00	10,00	0,00
	10	10,00	10,00	10,00	10,00	0,00
	100	10,00	10,00	10,00	10,00	0,00
	400	10,00	10,00	10,00	10,00	0,00
15,37	0	10,00	10,00	10,00	10,00	0,00
	10	10,00	10,00	10,00	10,00	0,00
	100	10,00	10,00	10,00	10,00	0,00
	400	10,00	10,00	10,00	10,00	0,00
19,15	0	10,00	10,00	10,00	10,00	0,00
	10	10,00	10,00	10,00	10,00	0,00
	100	10,00	10,00	10,00	10,00	0,00
	400	10,00	10,00	10,00	10,00	0,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Análisis de los pesos de las muestras de café recién despulpado, posterior al proceso de desmucilaginado de café**

Temperatura ambiental (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Peso de la muestra (kg)				
		R1	R2	R3	\bar{x}	σ
14,56	0	9,10	8,97	9,00	9,02	0,07
	10	8,93	8,92	8,79	8,88	0,08
	100	8,72	8,76	8,62	8,70	0,07
	400	8,38	8,31	8,37	8,35	0,04
15,37	0	9,16	9,28	9,31	9,25	0,08
	10	9,15	9,21	9,24	9,20	0,05
	100	8,89	8,81	8,87	8,86	0,04
	400	8,52	8,36	8,31	8,40	0,11
19,15	0	9,50	9,62	9,45	9,52	0,09
	10	9,06	8,98	9,02	9,02	0,04
	100	8,67	8,75	8,78	8,73	0,06
	400	8,36	8,35	8,27	8,33	0,05

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Diferencia de los pesos promedio de las muestras de café recién despulpado, previo y posterior al proceso de desmucilaginado de café**

Temperatura ambiental (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Proceso de remoción de mucílago		
		Peso promedio previo a remoción (kg)	Peso promedio posterior a remoción (kg)	Diferencia de pesos (kg)
14,56	0	10,00	9,02	0,98
	10	10,00	8,88	1,12
	100	10,00	8,70	1,30
	400	10,00	8,35	1,65
15,37	0	10,00	9,25	0,75
	10	10,00	9,20	0,80
	100	10,00	8,86	1,14
	400	10,00	8,40	1,60
19,15	0	10,00	9,52	0,48
	10	10,00	9,02	0,98
	100	10,00	8,73	1,27
	400	10,00	8,33	1,67

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Análisis de los pH de las muestras de café recién despulpado, previo al proceso de desmucilaginado de café**

Temperatura ambiental (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	pH de la muestra				
		R1	R2	R3	\bar{x}	σ
14,56	0	4,80	4,76	4,90	4,82	0,07
	10	4,01	3,95	3,96	3,97	0,03
	100	4,18	4,18	4,17	4,18	0,01
	400	4,49	4,46	4,47	4,47	0,02
15,37	0	5,24	5,18	5,15	5,19	0,05
	10	4,14	4,04	4,06	4,08	0,05
	100	4,03	4,08	4,05	4,05	0,03
	400	3,96	3,94	3,97	3,96	0,02
19,15	0	4,29	4,27	4,33	4,30	0,03
	10	4,95	5,08	5,07	5,03	0,07
	100	4,63	4,60	4,65	4,63	0,03
	400	4,45	4,37	4,37	4,40	0,05

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Análisis de los pH de las muestras de café recién despulpado, posterior al proceso de desmucilaginado de café**

Temperatura ambiental (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	pH de la muestra				
		R1	R2	R3	\bar{x}	σ
14,56	0	5,76	5,77	5,92	5,82	0,09
	10	4,18	4,15	4,17	4,17	0,02
	100	4,43	4,49	4,42	4,45	0,04
	400	4,57	4,58	4,49	4,55	0,05
15,37	0	5,84	5,80	5,60	5,75	0,13
	10	4,64	4,63	4,70	4,66	0,04
	100	4,48	4,45	4,50	4,48	0,03
	400	4,26	4,47	4,62	4,45	0,18
19,15	0	5,85	5,93	5,94	5,91	0,05
	10	5,97	6,02	5,94	5,98	0,04
	100	5,66	5,72	5,73	5,70	0,04
	400	5,22	5,18	5,80	5,40	0,35

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Diferencia de pH promedio de las muestras de café recién despulpado, previo y posterior al proceso de desmucilaginado de café**

Temperatura ambiental (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Proceso de remoción de mucílago		
		pH Promedio previo a remoción	pH Promedio posterior a remoción	Diferencia de pH
14,56	0	4,82	5,82	1,00
	10	3,97	4,17	0,20
	100	4,18	4,45	0,27
	400	4,47	4,55	0,08
15,37	0	5,19	5,75	0,56
	10	4,08	4,66	0,58
	100	4,05	4,48	0,43
	400	3,96	4,45	0,49
19,15	0	4,30	5,91	1,61
	10	5,03	5,98	0,95
	100	4,63	5,70	1,07
	400	4,40	5,40	1,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Análisis de los tiempos de remoción del mucílago de café**

Temperatura ambiental (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Tiempo de remoción (h)				
		R1	R2	R3	\bar{x}	σ
14,56	0	7,0	7,0	7,0	7,0	0,0
	10	6,5	6,5	6,5	6,5	0,0
	100	6,0	6,0	6,0	6,0	0,0
	400	5,5	5,5	5,5	5,5	0,0
15,37	0	7,0	7,0	7,0	7,0	0,0
	10	6,0	6,0	6,0	6,0	0,0
	100	6,0	6,0	6,0	6,0	0,0
	400	5,5	5,5	5,5	5,5	0,0
19,15	0	7,0	7,0	7,0	7,0	0,0
	10	6,0	6,0	6,0	6,0	0,0
	100	6,0	6,0	6,0	6,0	0,0
	400	5,5	5,5	5,5	5,5	0,0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Análisis de los pesos de las muestras de café recién desmucilaginado, previo al proceso de presecado**

Temperatura ambiental (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Peso de la muestra (kg)				
		R1	R2	R3	\bar{x}	σ
24,49	0	9,50	9,62	9,45	9,52	0,09
	10	9,06	8,98	9,02	9,02	0,04
	100	8,67	8,75	8,78	8,73	0,06
	400	8,36	8,35	8,27	8,33	0,05
25,81	0	9,10	8,97	9,00	9,02	0,07
	10	8,93	8,92	8,79	8,88	0,08
	100	8,72	8,76	8,62	8,70	0,07
	400	8,38	8,31	8,37	8,35	0,04
26,53	0	9,16	9,28	9,31	9,25	0,08
	10	9,15	9,21	9,24	9,20	0,05
	100	8,89	8,81	8,87	8,86	0,04
	400	8,52	8,36	8,31	8,40	0,11

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Análisis de los pesos de las muestras de café recién desmucilaginado, posterior al proceso de presecado**

Temperatura ambiental (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Peso de la muestra (kg)				
		R1	R2	R3	\bar{x}	σ
24,49	0	7,03	7,06	7,01	7,03	0,02
	10	6,87	6,85	6,94	6,89	0,05
	100	6,74	6,80	6,86	6,80	0,06
	400	6,68	6,71	6,65	6,68	0,03
25,81	0	6,87	6,96	7,02	6,95	0,08
	10	7,01	6,72	6,65	6,79	0,19
	100	6,98	6,96	6,82	6,92	0,09
	400	6,71	6,57	6,81	6,70	0,12
26,53	0	7,23	7,25	7,22	7,23	0,02
	10	6,91	6,90	6,85	6,89	0,03
	100	6,77	6,79	6,75	6,77	0,02
	400	6,70	6,64	6,50	6,61	0,10

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Diferencia de los pesos promedio de las muestras de café recién desmucilaginado, previo y posterior al proceso de presecado**

Temperatura ambiental (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Proceso de presecado		
		Peso promedio previo a presecado (kg)	Peso promedio posterior a presecado (kg)	Diferencia de pesos (kg)
24,49	0	9,52	7,03	2,49
	10	9,02	6,89	2,13
	100	8,73	6,80	1,93
	400	8,33	6,68	1,65
25,81	0	9,02	6,95	2,07
	10	8,88	6,79	2,09
	100	8,70	6,92	1,78
	400	8,35	6,70	1,65
26,53	0	9,25	7,23	2,02
	10	9,20	6,89	2,31
	100	8,86	6,77	2,09
	400	8,40	6,61	1,79

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Análisis de los porcentajes de humedad de las muestras de café recién desmucilaginado, previo al proceso de presecado**

Temperatura ambiental (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Porcentaje de humedad de la muestra (%)				
		R1	R2	R3	\bar{x}	σ
24,49	0	59,12	59,43	59,68	59,41	0,28
	10	57,47	57,65	58,17	57,76	0,36
	100	56,84	57,18	57,57	57,20	0,37
	400	54,80	54,64	53,72	54,39	0,58
25,81	0	58,97	58,33	56,95	58,08	1,03
	10	56,16	60,82	57,89	58,29	2,35
	100	55,97	56,33	58,72	57,01	1,50
	400	56,09	56,21	55,17	55,82	0,57
26,53	0	55,96	57,61	57,51	57,03	0,93
	10	58,03	59,27	56,66	57,99	1,30
	100	57,50	55,54	57,04	56,69	1,02
	400	55,76	56,21	55,09	55,69	0,56

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Análisis de los porcentajes de humedad de las muestras de café recién desmucilaginado, posterior al proceso de presecado**

Temperatura ambiental (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Porcentaje de humedad de la muestra (%)				
		R1	R2	R3	\bar{x}	σ
24,49	0	44,72	44,71	45,68	45,03	0,56
	10	43,90	44,48	45,63	44,67	0,88
	100	44,51	44,90	45,70	45,03	0,60
	400	43,43	43,51	42,41	43,12	0,62
25,81	0	45,68	46,28	44,84	45,60	0,72
	10	44,15	47,95	44,37	45,49	2,13
	100	45,00	45,06	47,86	45,97	1,63
	400	45,17	44,60	44,90	44,89	0,28
26,53	0	44,23	45,74	45,17	45,05	0,76
	10	44,45	45,59	41,58	43,87	2,07
	100	44,19	42,30	43,50	43,33	0,95
	400	43,73	44,86	42,55	43,72	1,16

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Diferencia de los porcentajes de humedad promedio de las muestras de café recién desmucilaginado, previo y posterior al proceso de presecado**

Temperatura ambiental (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Proceso de presecado		
		Porcentaje de humedad promedio previo a presecado (%)	Porcentaje de humedad promedio posterior a presecado (%)	Diferencia de porcentaje de humedad (%)
24,49	0	59,41	45,03	14,38
	10	57,76	44,67	13,09
	100	57,20	45,03	12,17
	400	54,39	43,12	11,27
25,81	0	58,08	45,60	12,48
	10	58,29	45,49	12,80
	100	57,01	45,97	11,04
	400	55,82	44,89	10,93
26,53	0	57,03	45,05	11,98
	10	57,99	43,87	14,12
	100	56,69	43,33	13,36
	400	55,69	43,72	11,97

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Análisis de los tiempos de presecado del café**

Temperatura ambiental (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Tiempo de presecado (h)				
		R1	R2	R3	\bar{x}	σ
24,49	0	6,0	6,0	6,0	6,0	0,0
	10	5,5	5,5	5,5	5,5	0,0
	100	5,5	5,5	5,5	5,5	0,0
	400	5,5	5,5	5,5	5,5	0,0
25,81	0	6,0	6,0	6,0	6,0	0,0
	10	5,5	5,5	5,5	5,5	0,0
	100	5,5	5,5	5,5	5,5	0,0
	400	5,5	5,5	5,5	5,5	0,0
26,53	0	5,5	5,5	5,5	5,5	0,0
	10	4,5	4,5	4,5	4,5	0,0
	100	4,5	4,5	4,5	4,5	0,0
	400	4,5	4,5	4,5	4,5	0,0

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

El diseño experimental está constituido por cuatro tratamientos de concentración de enzimas y por tres tratamientos de temperatura, se realizaron tres repeticiones de cada muestra que constituye la parte experimental de la investigación. Por lo tanto, se obtuvieron 36 unidades experimentales.

3.8.1. Media aritmética

$$\bar{x} = \frac{\sum_I^N X_I}{N} \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde:

- \bar{x} = media
- $\sum_I^N X_I$ = sumatoria de valores
- N = número de datos

3.8.2. Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (xi - \bar{x})^2}{N-1}} \quad [\text{Ec. 2}]$$

Donde:

- σ = desviación estándar
- \bar{x} = valor promedio
- xi = valor de la muestra
- N = número de datos

3.8.3. Análisis de varianza

La comprobación de la hipótesis nula y alternativa se realizó utilizando el análisis de varianza de dos factores por medio de Microsoft Excel, utilizando una significancia del 5 %.

3.8.4. Prueba de Tukey

Este método tiene como objetivo encontrar el o los mejores tratamientos del experimento, cosa que no se puede determinar simplemente por el análisis de varianza ya que éste solo pone a prueba las hipótesis nulas y alternativas. Este método se calculó a través del programa Minitab 18.

4. RESULTADOS

Tabla XXII. **Diferencia de los pesos promedio de las muestras de café recién despulpado, previo y posterior al proceso de desmucilaginado de café**

Temperatura ambiental promedio (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Proceso de remoción de mucílago		
		Peso promedio previo a remoción (kg)	Peso promedio posterior a remoción (kg)	Diferencia de pesos (kg)
14,56	0	10,00	9,02	0,98
	10	10,00	8,88	1,12
	100	10,00	8,70	1,30
	400	10,00	8,35	1,65
15,37	0	10,00	9,25	0,75
	10	10,00	9,20	0,80
	100	10,00	8,86	1,14
	400	10,00	8,40	1,60
19,15	0	10,00	9,52	0,48
	10	10,00	9,02	0,98
	100	10,00	8,73	1,27
	400	10,00	8,33	1,67

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Diferencia de pH promedio de las muestras de café recién despulpado, previo y posterior al proceso de desmucilaginado de café**

Temperatura ambiental (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Proceso de remoción de mucílago		
		pH promedio previo a remoción	pH promedio posterior a remoción	Diferencia de pH
14,56	0	4,82	5,82	1,00
	10	3,97	4,17	0,20
	100	4,18	4,45	0,27
	400	4,47	4,55	0,08
15,37	0	5,19	5,75	0,56
	10	4,08	4,66	0,58
	100	4,05	4,48	0,43
	400	3,96	4,45	0,49
19,15	0	4,30	5,91	1,61
	10	5,03	5,98	0,95
	100	4,63	5,70	1,07
	400	4,40	5,40	1,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Tiempos promedio de remoción del mucílago de café**

Temperatura ambiental (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Tiempo de remoción de mucílago promedio (h)
14,56	0	7,0
	10	6,5
	100	6,0
	400	5,5
15,37	0	7,0
	10	6,0
	100	6,0
	400	5,5
19,15	0	7,0
	10	6,0
	100	6,0
	400	5,5

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Diferencia de los pesos promedio de las muestras de café recién desmucilaginado, previo y posterior al proceso de presecado de café**

Temperatura ambiental (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Proceso de presecado		
		Peso promedio previo a presecado (kg)	Peso promedio posterior a presecado (kg)	Diferencia de pesos (kg)
24,49	0	9,52	7,03	2,49
	10	9,02	6,89	2,13
	100	8,73	6,80	1,93
	400	8,33	6,68	1,65
25,81	0	9,02	6,95	2,07
	10	8,88	6,79	2,09
	100	8,70	6,92	1,78
	400	8,35	6,70	1,65
26,53	0	9,25	7,23	2,02
	10	9,20	6,89	2,31
	100	8,86	6,77	2,09
	400	8,40	6,61	1,79

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Diferencia de los porcentajes de humedad promedio de las muestras de café recién desmucilaginado, previo y posterior al proceso de presecado de café**

Temperatura ambiental (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Proceso de presecado		
		Porcentaje de humedad promedio previo a presecado (%)	Porcentaje de humedad promedio posterior a presecado (%)	Diferencia de porcentaje de humedad (%)
24,49	0	59,41	45,03	14,38
	10	57,76	44,67	13,09
	100	57,20	45,03	12,17
	400	54,39	43,12	11,27
25,81	0	58,08	45,60	12,48
	10	58,29	45,49	12,80
	100	57,01	45,97	11,04
	400	55,82	44,89	10,93
26,53	0	57,03	45,05	11,98
	10	57,99	43,87	14,12
	100	56,69	43,33	13,36
	400	55,69	43,72	11,97

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Tiempos promedio de presecado de café**

Temperatura ambiental (°C)	Concentración de enzimas (ppm)	Tiempo de presecado promedio (h)
24,49	0	6,0
	10	5,5
	100	5,5
	400	5,5
25,81	0	6,0
	10	5,5
	100	5,5
	400	5,5
26,53	0	5,5
	10	4,5
	100	4,5
	400	4,5

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Actualmente, se busca la optimización de los distintos procesos en la industria del café en Guatemala sin comprometer la calidad del mismo grano. Ya que el café producido en el país es de alto prestigio internacional y es uno de los grandes pilares de la economía guatemalteca. Por lo tanto, el método enzimático para la remoción del mucílago de café se vuelve una alternativa viable de analizar, y de su posible implementación en la industria guatemalteca del café.

Se realizó el experimento en el beneficio de café de Aguasanta en Fraijanes, Guatemala. Se analizaron muestras de café con tres concentraciones de enzimas distintas y una muestra testigo sin enzimas, además de experimentar en tres horarios diferentes en tres días diferentes, con el fin de obtener temperaturas distintas.

En el proceso del desmucilaginado se evaluó el peso y el pH del café, tanto como sus diferencias, previo y posterior al proceso mismo, y el tiempo del proceso, afectados por la temperatura y la concentración de enzimas aplicada. Mientras que en el proceso del presecado se evaluó el peso, porcentaje de humedad y sus diferencias; al ser estos afectados por la temperatura y concentración de enzimas aplicadas. Esto con el fin de comprobar las hipótesis y de los efectos del asistimiento enzimático y la temperatura en la remoción del mucílago de café y su presecado en patio, además de considerar la posible aplicación de enzimas en la industria de café guatemalteca y sus beneficios en el proceso del desmucilaginado y presecado en patio para el oreado del café mismo.

En la evaluación de peso del café, previo y posterior al proceso de desmucilaginado asistido enzimáticamente, se obtuvo una mayor diferencia de peso a una mayor concentración de enzimas, como se muestra en la tabla XXII. Esto afirma el efecto positivo de las enzimas en la remoción del mucílago de café, ya que la remoción se realiza de una manera más eficiente, sin ser afectado de una manera significativa por la temperatura. Esto se comprueba por medio del ANOVA de dos factores en el apéndice 2, ya que la F de Fisher es mayor a la F crítica, en el caso de la concentración de enzimas, y la F de Fisher es menor a la F crítica en el caso de la temperatura. Lo cual afirma, que el café desmucilaginado asistido enzimáticamente, deja una cantidad residual menor de mucílago de café en el grano, lo cual trae efectos positivos en la calidad del grano mismo.

En la evaluación de pH del café previo y posterior al desmucilaginado del café, como se muestra en la tabla XXIII, se puede apreciar que el café posee un pH ácido, el cual tiene efecto en la actividad de las enzimas; sin embargo, este pH se encuentra en el rango de pH óptimo para estas enzimas utilizadas para el experimento. Además, se puede apreciar que posterior a la remoción del mucílago, el pH aumenta en una ligera cantidad, lo cual demuestra que el mucílago aporta acidez al café.

En la tabla XXIV se aprecian los tiempos de remoción de mucílago de café a diferentes concentraciones y temperaturas. Se observa que los tiempos son afectados tanto por la concentración de enzimas como de la temperatura. Lo cual se comprueba en el ANOVA de dos factores respectivo del apéndice 2. Donde la F de Fisher es mayor a la F crítica para la concentración de enzimas y la temperatura. Esto comprueba la viabilidad de la aplicación de enzimas en el desmucilaginado del café, con el fin de obtener un desmucilaginado más rápido y eficiente, y así obtener una mayor capacidad de producción sin dañar la

calidad e integridad del grano de café mismo, además de los beneficios de la utilización de un método biológico que no provoca daños al medio ambiente.

En la evaluación del peso de café y porcentaje de humedad, previo y posterior al proceso de presecado, tal como se observa en las tablas XXV y XXVI, se aprecia que la diferencia de peso y el porcentaje de humedad inicial fueron mayores cuando la concentración de enzimas era menor en el proceso de desmucilaginado y viceversa, esto se debe a la existencia de mucílago residual presente en el grano de café cuando se utiliza el método natural para el proceso del desmucilaginado; por lo cual, el café tiene una mayor humedad inicial para el proceso de presecado, y por lo mismo, hay un mayor diferencial de agua en el mismo con respecto al final del presecado en patio.

Esto se comprueba por medio del ANOVA de diferencia de peso del apéndice 2, donde la F de Fisher es mayor a la F crítica para la concentración de enzimas. Sin embargo, esto no se puede comprobar por medio del ANOVA de diferencia de porcentaje de humedad del apéndice 2, ya que la F de Fisher es menor a la F crítica. Sin embargo, esto se debe a que, por ser un experimento totalmente aplicado en la práctica, los porcentajes de humedad finales obtenidos en el presecado en patio no son exactamente los mismos entre cada muestra, ya que así si hubiera sido posible evaluar correctamente las diferencias de porcentaje de humedad.

Por otro lado, esto también se puede comprobar por medio del análisis estadístico de Tukey, como se puede apreciar de igual forma en el apéndice 2, ya que este análisis muestra la similitud de comportamiento de las medias para los distintos criterios, y en este caso, se observa que las medias son identificadas con la misma agrupación A, lo que significa que todas se

comportan igual y no hay diferencia entre ellas ocasionadas por el efecto de la concentración de enzimas.

En la tabla XXVII se observa el comportamiento del tiempo de presecado con respecto a la temperatura ambiental y la concentración de enzimas. Se puede apreciar que los tiempos en el presecado son menores a una mayor concentración de enzimas en el proceso de desmucilaginado, al igual que a una mayor temperatura ambiental. Lo cual comprueba las hipótesis con respecto al efecto de la temperatura y las enzimas en el presecado en patio para obtener un café oreado en una menor cantidad de tiempo. Lo cual se puede corroborar en apéndice 2, donde la F de Fisher es mayor a la F crítica para ambos casos.

Esto es un gran beneficio para la industria del café en Guatemala, ya que asistir enzimáticamente el proceso de desmucilaginado trae beneficios tanto para la remoción de mucilago, como para el presecado en patio, y esto se debe a que, a una mayor eficiencia en el desmucilaginado, se obtiene un menor porcentaje de humedad inicial para el proceso de presecado; por lo tanto, es posible realizar este mismo en una menor cantidad de tiempo. Todo esto con el fin de optimizar la producción en el beneficiado de café y así tener la capacidad de procesar una mayor cantidad de café en una menor cantidad de tiempo.

CONCLUSIONES

1. El diferencial de peso en el desmucilaginado asistido enzimáticamente se ve afectado significativamente por la concentración de enzimas aplicadas en el mismo, sin embargo, no se ve afectado significativamente con respecto a la temperatura ambiental.
2. El pH del café es ácido y se encuentra en el rango trabajable óptimo de las enzimas, además, este se ve ligeramente afectado por el mucílago propio del mismo.
3. El tiempo de desmucilaginado se ve afectado por la concentración de enzimas y temperatura ambiental aplicadas en el mismo.
4. El diferencial de peso del café en el presecado se ve afectado significativamente por la concentración de enzimas aplicada en el desmucilaginado y la temperatura ambiental aplicada en el presecado.
5. El diferencial de porcentaje de humedad en el presecado no se ve afectado significativamente por la concentración de enzimas aplicada en el desmucilaginado y la temperatura ambiental aplicada en el presecado.
6. El porcentaje de humedad inicial del presecado es inversamente proporcional a la concentración de enzimas aplicadas en el proceso de desmucilaginado.

7. El tiempo de desmucilaginado se ve afectado significativamente a la concentración de enzimas aplicada en el proceso de desmucilaginado y temperatura ambiental aplicada en el presecado.

RECOMENDACIONES

1. Realizar el experimento en otros beneficios de café donde las condiciones varíen en una proporción mayor, con el fin de observar los resultados obtenidos.
2. Analizar la posible reutilización de las enzimas en los tratamientos, con el fin de observar que tan viable es la reutilización de las mismas durante el proceso por medio de la recirculación de las aguas mieles para el transporte del café en el despulpado y desmucilaginado.
3. Determinar viabilidad económica del proyecto.
4. Utilizar otras combinaciones de enzimas que aporten otras características, con el fin de observar la variación en los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

1. BECKLEY, V. *Enzymes and Bacteria in Coffee Fermentation*. Kenia: Departamento de Agricultura, 1930. 343 p.
2. BOYER, Rodney. *Conceptos de Bioquímica*. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., 2010. 203 p.
3. CHOUSSEY, Francois. *Technical Studies on the Fermentation of Coffee*. Cuba : Agrotecnia, 1948. 98 p.
4. FRITZ, A. *Processing of Coffee without Fermentation*. Guatemala: Revista Agrícola, 1933. 48 p.
5. FUKUNAGA, E. *A New Mechanical Coffee Demucilaging Machine*. Hawaii: Estación de agricultura para experimentación de Hawaii, 1957. 200 p.
6. PEDERSON, C.; BREED, R. *Coffee Fermentation*. Estados Unidos: Food Research, 1946. 138 p.
8. SIVETZ, Michael; FOOTE, Elliott. *Coffee Processing Technology*. USA: The Avi Publishing Company, Inc, 1963. 144 p.
7. STERN, J. *Methods of Fermenting Coffee*. México: Revista Sociedad Mexicana Histórica, 1948. 120 p.

8. SUMMER, J.; SOMERS, G. *Chemistry and Methods of Enzymes*. Estados Unidos: Academic Press, 1947. 99 p.
9. SUMMER, J.; MYRBACK, K. *The Enzymes*. Estados Unidos: Academic Press, 1951. 149 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Temperaturas ambientales

Medición de las temperaturas del día para las corridas de las 23:30, 00:30 y 01:30 horas.

Corrida 15 y 16 febrero 2018 (23:30 horas)		Corrida 13 de febrero 2018 (00:30 horas)		Corrida 14 de febrero 2018 (01:30 horas)	
Hora	Temperatura (°F)	Hora	Temperatura (°F)	Hora	Temperatura (°F)
23:30	71	00:30	62	01:30	62
00:00	69	01:00	61	02:00	61
00:30	69	01:30	61	02:30	61
01:00	68	02:00	60	03:00	60
01:30	68	02:30	60	03:30	60
02:00	68	03:00	58	04:00	60
02:30	68	03:30	58	04:30	58
03:00	68	04:00	56	05:00	59
03:30	68	04:30	55	05:30	60
04:00	66	05:00	54	06:00	58
04:30	65	05:30	55	06:30	59
05:00	64	06:00	57	07:00	57
05:30	62	06:30	58	07:30	58
06:00	62	07:00	58	08:00	61
06:30	61	07:30	60	08:30	61
07:00	62	08:00	60	09:00	65
07:30	63	08:30	60	09:30	68
08:00	69	09:00	64	10:00	72
08:30	70	09:30	71	10:30	75
09:00	74	10:00	73	11:00	76
09:30	77	10:30	75	11:30	78
10:00	78	11:00	75	12:00	78
10:30	80	11:30	77	12:30	82
11:00	80	12:00	81	13:00	84
11:30	79	12:30	85	13:30	86
12:00	76	13:00	92	14:00	88
12:30	79	13:30	88	14:30	85
13:00	80	14:00	88	15:00	85
13:30	84	14:30	91	15:30	83

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Análisis de varianza de diferencia de peso en desmucilaginado**

Análisis de varianza

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico para F
Filas (Temperatura)	0,02406667	1	0,02406667	15,8681319	18,5128205
Columnas (Concentración de Enzimas)	0,55943333	2	0,27971667	184,428571	19
Error	0,00303333	2	0,00151667		
Total	0,58653333	5			

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Análisis de varianza de tiempo en desmucilaginado**

Análisis de varianza

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico para F
Filas	0	1	0	65535	18,5128205
Columnas	0,33333333	2	0,16666667	65535	19
Error	0	2	0		
Total	0,33333333	5			

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Análisis de varianza de diferencia de peso en presecado**

Análisis de varianza

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico para F
Filas	0,07481667	1	0,07481667	20,6866359	18,5128205
Columnas	0,23123333	2	0,11561667	31,9677419	19
Error	0,00723333	2	0,00361667		
Total	0,31328333	5			

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Análisis de varianza de diferencia de porcentaje de humedad en presecado**

Análisis de varianza

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico para F
Filas	3,6504	1	3,6504	16,1236749	18,5128205
Columnas	4,1268	2	2,0634	9,1139576	19
Error	0,4528	2	0,2264		
Total	8,23	5			

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Análisis de varianza de tiempo en presecado

Análisis de varianza

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico para F
Filas	1,5	1	1,5	65535	18,5128205
Columnas	0	2	0	65535	19
Error	0	2	0		
Total	1,5	5			

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. Comparaciones en parejas de Tukey, 1

Prueba de Tukey de la diferencia de peso en el desmucilaginado respecto a la temperatura.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Temperatura	N	Media	Agrupación
14.56	4	1.263	A
19.15	4	1.100	A
15.37	4	1.073	A

Continuación del apéndice 7.

Prueba de Tukey de la diferencia de peso en el desmucilaginado respecto a la concentración de enzimas.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Concentración	N	Media	Agrupación
400	3	1.6400	A
100	3	1.2367	A B
10	3	0.9667	B C
0	3	0.737	C

Prueba de Tukey del tiempo en el desmucilaginado respecto a la temperatura.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Temperatura	N	Media	Agrupación
14.56	4	6.250	A
19.15	4	6.125	A
15.37	4	6.125	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Continuación del apéndice 7.

Prueba de Tukey del tiempo en el desmucilaginado respecto a la concentración de enzimas.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Concentración	N	Media	Agrupación
0	3	7.000	A
10	3	6.167	B
100	3	6.000	B
400	3	5.500	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Prueba de Tukey de la diferencia de peso en el presecado respecto a la temperatura.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Temperatura	N	Media	Agrupación
26.53	4	2.072	A
24.49	4	2.050	A
25.81	4	1.898	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Continuación del apéndice 7.

Prueba de Tukey de la diferencia de peso en el presecado respecto a la concentración de enzimas.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

<u>Concentración</u>	<u>N</u>	<u>Media</u>	<u>Agrupación</u>
10	3	2.2033	A
0	3	2.193	A
100	3	1.9333	A B
400	3	1.6967	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Prueba de Tukey de la diferencia de porcentaje de humedad en el presecado respecto a la temperatura.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

<u>Temperatura</u>	<u>N</u>	<u>Media</u>	<u>Agrupación</u>
26.53	4	12.858	A
24.49	4	12.703	A
25.81	4	11.813	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Continuación del apéndice 7.

Prueba de Tukey de la diferencia de porcentaje de humedad en el presecado respecto a la concentración de enzimas.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Concentración	N	Media	Agrupación
10	3	13.337	A
0	3	12.947	A
100	3	12.190	A
400	3	11.357	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Prueba de Tukey del tiempo en el presecado respecto a la temperatura.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Temperatura	N	Media	Agrupación
25.81	4	5.625	A
24.49	4	5.625	A
26.53	4	4.750	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Continuación del apéndice 7.

Prueba de Tukey del tiempo en el presecado respecto a la concentración de enzimas.

Comparaciones en parejas de Tukey

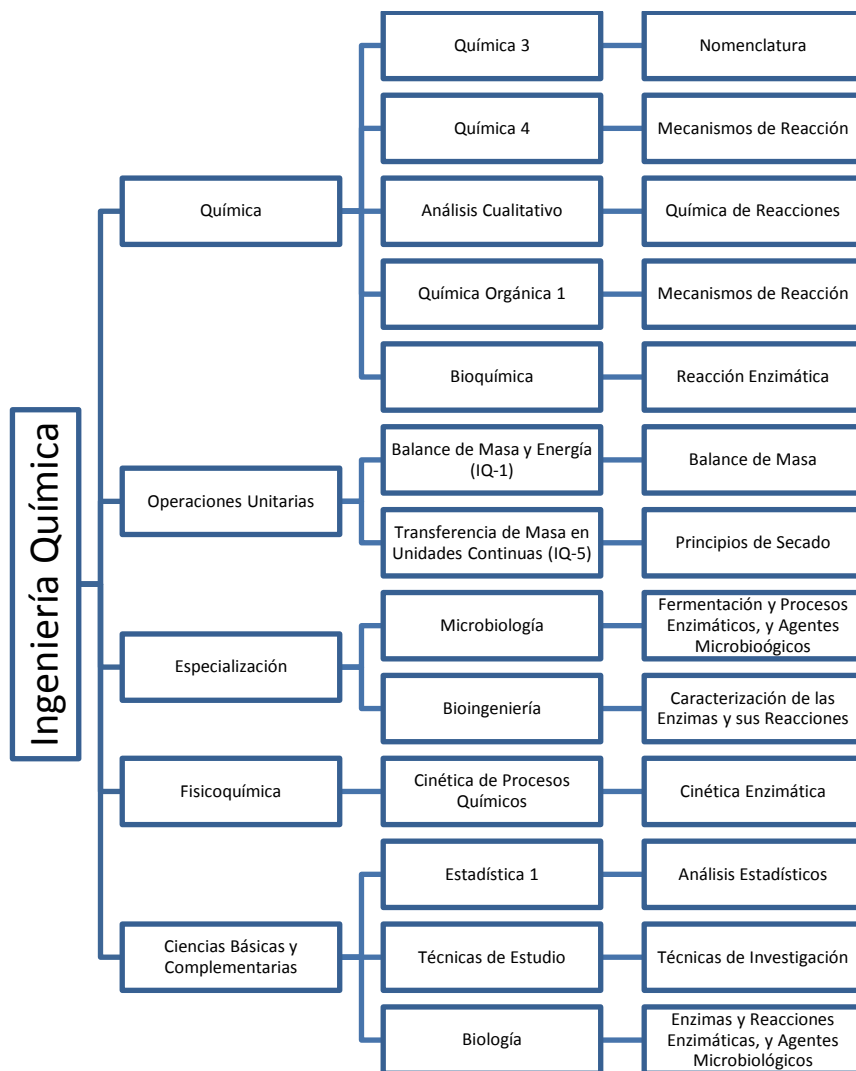
Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Concentración	N	Media	Agrupación
0	3	5.833	A
400	3	5.167	A
100	3	5.167	A
10	3	5.167	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

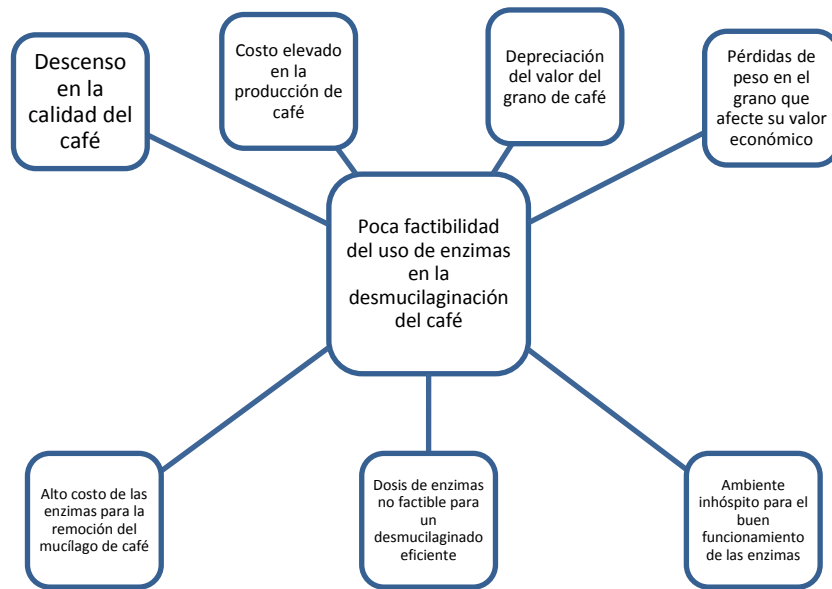
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Tabla de requisitos académicos**



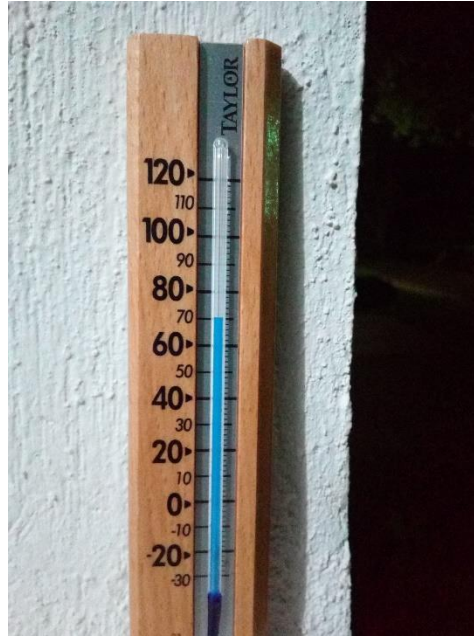
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. Medición de temperatura



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. Recolección de muestras



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. Preparación de enzimas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. Mezclado de enzimas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. Verificación del desmucilaginado



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Medición de ph**



Fuente: elaboración propia.

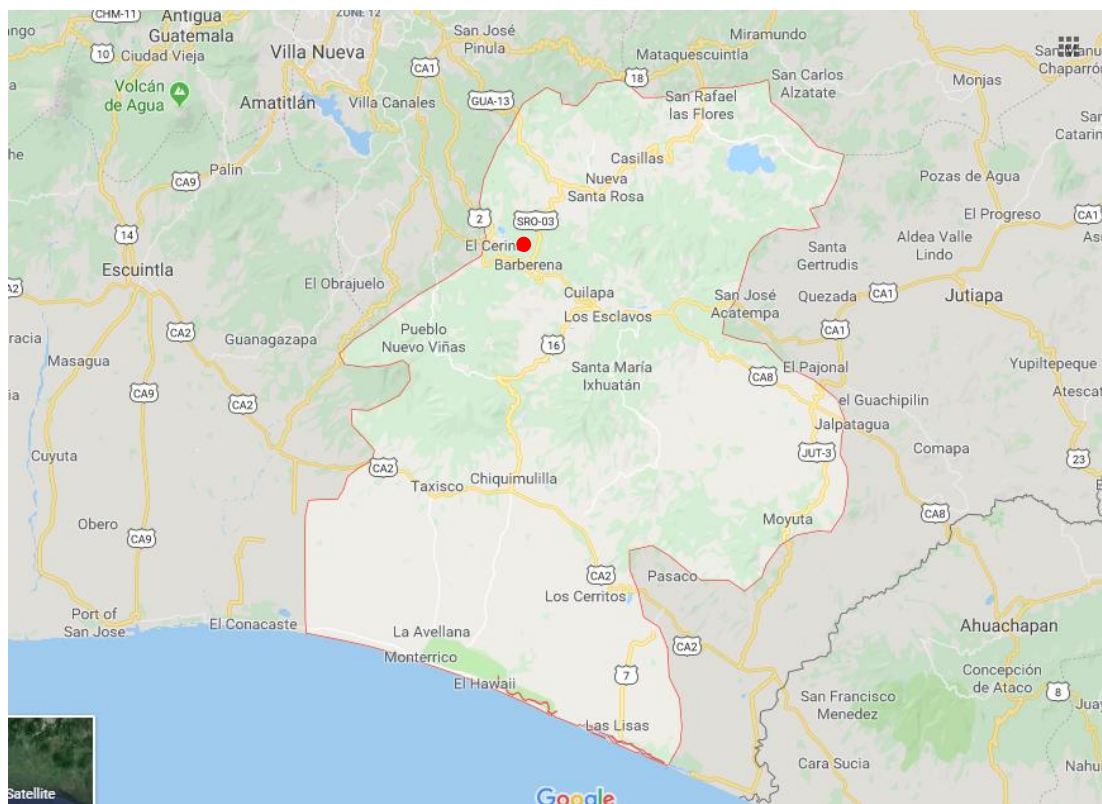
Apéndice 16. **Presecado en patio**



Fuente: elaboración propia.

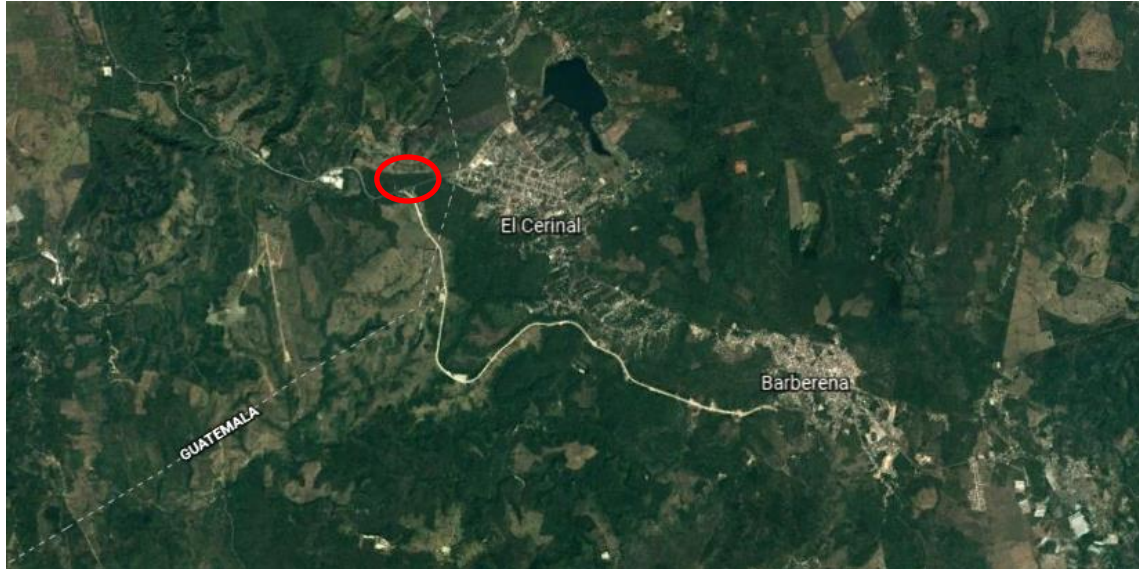
ANEXOS

Anexo 1. **Ubicación de beneficio de café de Agua Santa, mapa de Santa Rosa, Guatemala**



Fuente: *Google Maps*. <https://maps.google.com>. Consulta: 26 de septiembre de 2018.

Anexo 2. **Ubicación de beneficio de café de Agua Santa, satelital**



Fuente: *Google Maps*. <https://maps.google.com>. Consulta: 26 de septiembre de 2018.