

# Planificación y Sistemas de control de variables para la Fermentación del café en Guatemala.

Fecha de recepción: 10 junio del 2023

Fecha de corrección: 28 julio 2023

Norman Orozco, Ing.Qco<sup>1</sup> .

## RESUMEN

La siguiente investigación presenta un plan de trabajo para establecer el control del proceso de la fermentación del café arábica en la región de Santa Rosa, Guatemala.

Se analizaron factores físicos, químicos y biológicos los cuáles son fundamentales para determinar el punto óptimo de la fermentación del café durante su producción.

El estudio fue realizado durante la temporada diciembre 2018-marzo 2019.

Como plan de estandarización y control, la investigación contiene una

explicación metódica de las variables recomendadas de estudio y constantes obtenidas durante su desarrollo para futuros cálculos.

El estudio concluye con una propuesta a implementar el diseño de experimentos (DOE) en función a los resultados para determinar cuál fue la mejor combinación de variables que obtengan como resultado el mejor punteo del café en catación.

**Palabras clave:** Tiempo, pH, °Brix, Peso, Beneficio húmedo, fermentación, Maduro, pergamino, café oro, Ácido láctico, levaduras.

## ABSTRACT

**Planning and control systems of variables for the fermentation of coffee in Guatemala.**

The following research presents a work plan to establish the control parameters of the arabica coffee fermentation process, that takes place in the region of Santa Rosa, Guatemala.

The study was conducted during the season December 2018-March 2019.

As a standardization and control plan, the research contains a methodical explanation of the recommended study variables and constants obtained during their development for future calculations.

The study concludes with a proposal to use the design of experiments (DOE). In order to the Results obtained to determine which was the best combination of variables that result in the best coffee tasting in cupping.

**Keywords:** Time, pH, °Brix, Weight, Wet benefit, fermentation, Ripe, parchment, green coffee bean, Lactic acid, yeasts.

<sup>1</sup>Ingeniero Químico, MBBLSS, Especialista y auditor energético ISO 5001:2011., Estudios en Guatemala, Rusia y España, Investigador y Consultor de procesos industriales y energéticos. [aorozco@verdenlabs.com](mailto:aorozco@verdenlabs.com), Dominio [www.verdenlabs.com](http://www.verdenlabs.com)

# Planificación y Sistemas de control de variables para la Fermentación del café en Guatemala.

Fecha de recepción: 10 junio del 2023

Fecha de corrección: 28 julio 2023

## INTRODUCCIÓN (Anacafe, 2019)

Actualmente Guatemala es un País reconocido a nivel mundial por la calidad en producción del café, debido a la peculiaridad que tienen sus propiedades organolépticas.

Existen alrededor de 125,000 fincas en Guatemala que se dedican a la caficultura (actividades de siembra, producción y cosecha de café) en las que se busca siempre producir el mejor café para su exportación o consumo entre las personas, ya que Guatemala es un país que tiene hábitos en lo que respecta el consumo del café.

Las variedades existentes en el país son Arábica y Robusta los cuales se procesan en beneficios húmedos de café, el proceso para este tipo de beneficios contiene las siguientes etapas del proceso:

1. Picking o selección del café maduro.
2. Recepción y clasificación del grano.

## ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El proyecto requiere de diversos análisis químicos, físicos y microbiológicos.

Al tomar datos estadísticos en cada una de las propiedades descritas, es recomendable desarrollar un informe dividido en 4 etapas y un informe final por el período de tiempo que dure la temporada de producción del café.

Es recomendable realizar un informe semanal de datos recopilados para el análisis respectivo de los datos e identificación de alguna condición del proceso que pueda concurrir en el periodo, al recopilar los datos necesarios se debe realizar un análisis de correlación de

3. Flotación y selección del grano.

4. Cribado y clasificación.

5. Despulpe.

6. Fermentación.

7. Lavado.

8. Secado.

9. Almacenamiento en bodega.

Se realizó un estudio de control y estandarización del proceso de fermentación en un beneficio húmedo de una finca de café, ubicada en el departamento de Santa Rosa, estableciendo:

1. Tiempos y análisis de flujos para identificar las mermas de grano de café.

2. Identificación de las variables críticas en función del punteo de catación.

3. Determinación del tiempo ideal para fermentar el café.

variables para identificar y establecer un modelo matemático que identifique la relación de las variables de análisis en el proceso de la fermentación.

También se debe implementar un diseño de experimentos (DOE) por factoriales para encontrar la combinación de variables óptima para el desarrollo de la fermentación.

Los resultados de cada análisis se deben presentar en función a la eficiencia del proceso, calidad del producto y costes que puedan representar.

## Canalización del Conocimiento Científico

## Planificación y Sistemas de control de variables para la Fermentación del café en Guatemala.

**Fecha de recepción: 10 junio del 2023**

En caso de presentarse algún inconveniente con el análisis de datos, debe anticiparse con un mes del estudio

**Fecha de corrección: 28 julio 2023**

para compensar algún supuesto o falla en cualquiera de las etapas del proceso.

### **VARIABLES DE ESTUDIO** (Puerta & Rios Arias, 2011)

Para realizar el estudio de variables, se recomienda un análisis con intervalos de una hora y con un máximo de 48 horas dependiendo de la fermentación a las condiciones del medio.

Los parámetros de control para el sistema de fermentación, se establecen de la siguiente forma:

- **Tiempo:** El tiempo es el factor más importante para la etapa de la fermentación no solo por los tiempos de procesamiento de lote sino por la degradación de los nutrientes que por actividades enzimáticas o de microorganismos durante el proceso varían el resultado organoléptico del café.
- **pH:** el medio del café en baba (mezcla del mucilago) es ácido con intervalos de 4.9 – 6.0, el pH de la mezcla o sustrato puede disminuir durante las primeras 20 horas principalmente por la formación del ácido láctico y málico presente en los granos del café.
- **Temperatura:** la temperatura del medio favorece el crecimiento microbiológico (mesófilos y termofilos) y las condiciones de degradación en la fermentación, así

como en el pH por efecto de la proliferación microbiana.

- **°Brix:** los solidos disueltos de la mezcla corresponden a la cantidad de azúcares que pueden ser degradados por las bacterias facultativas en la fermentación.
- **Concentración del sistema:** la concentración corresponde a la proporción del peso de la mezcla (grano y mucílago) que en efecto esta directamente relacionada con el proceso de conversión y degradación del mucílago en el café para formar etanol.
- **Microorganismos:** la actividad enzimática, así como las bacterias facultativas selectivas del medio, pueden ser beneficiosas o perjudiciales para el proceso de fermentación, debido a sus productos durante la degradación del sistema.

Al identificar los microorganismos adecuados en la fermentación, mejoraran los tiempos de proceso, mejorarán los sistemas de control de las variables anteriormente mencionadas y se definirán los resultados organolépticos en la catación del café.

# Planificación y Sistemas de control de variables para la Fermentación del café en Guatemala.

Fecha de recepción: 10 junio del 2023

Fecha de corrección: 28 julio 2023

## MATERIAL Y EQUIPO

Para el estudio de cada variable se realizaron las mediciones correspondientes con los siguientes equipos:

- **Refractómetro:** para medir °Brix y los sólidos totales disueltos.  
Modelo utilizado: Kern-sohn ORA 32BA.

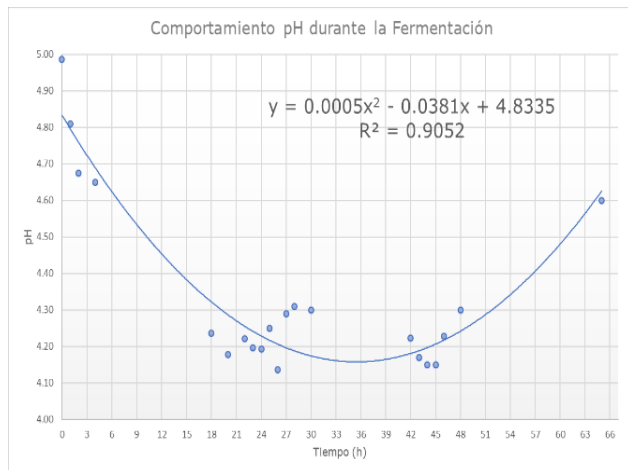
- **Potenciómetro:** para medir el pH del medio.  
Modelo utilizado: Bluelab pH pen.
- **Termómetro:** temperatura del medio.  
Modelo utilizado: Oxo Softworks, Thermometer.

## RECOPIACIÓN DE DATOS

La toma de datos en el periodo de enero a marzo se recopiló con un total de 400 datos por cada variable de modo que se promediaron los efectos de las variables en cada hora obtenida dentro del sistema de fermentación y lote en cada día.

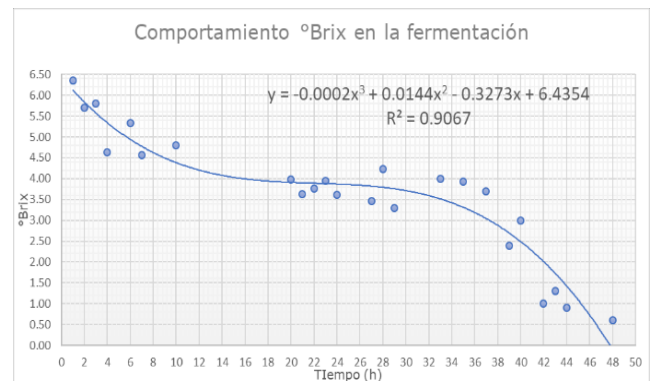
La tendencia gráfica de cada variable se presenta de la siguiente forma:

**Gráfica no. 1** comportamiento del pH en fermentación seca.



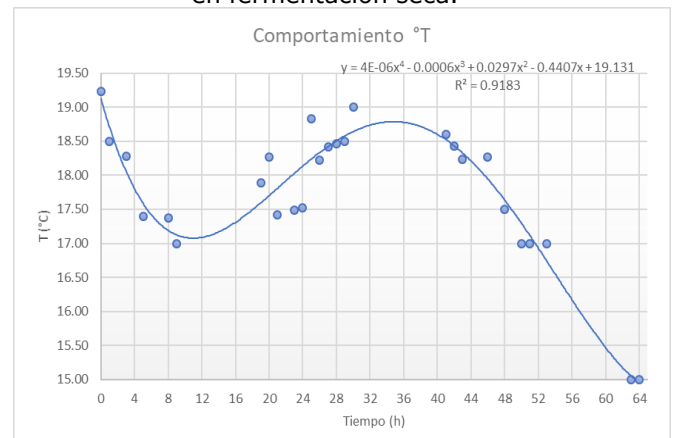
datos tomados en santa Rosa a una altitud mayor a 1000 m.s.n.m.

**Gráfica no. 2** comportamiento de los °Brix en fermentación seca.



datos tomados en santa Rosa a una altitud mayor a 1000 m.s.n.m.

**Gráfica no. 3** comportamiento de la temperatura en fermentación seca.



datos tomados en santa Rosa a una altitud mayor a 1000 m.s.n.m.

# Planificación y Sistemas de control de variables para la Fermentación del café en Guatemala.

Fecha de recepción: 10 junio del 2023

Fecha de corrección: 28 julio 2023

Gráfica no. 4 comportamiento del peso (100 granos) en fermentación seca.



datos tomados en santa Rosa a una altitud mayor a 1000 m.s.n.m.

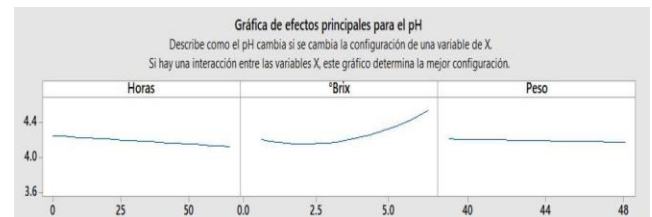
## RESULTADOS

Para determinar el "Punto óptimo de fermentación del café" se establece un modelo estadístico de predicción basado en las variables estudiadas el punto mínimo de la fermentación del pH puede indicar el tiempo óptimo de la fermentación debido al cese de la proliferación bacteriana de productoras de ácido láctico, se establece el análisis de la siguiente forma:

- Gráfica de efectos principales: evalúa las medias entre uno o más factores, es ideal para determinar la variable que tenga un comportamiento más relevante en el estudio.
- Gráfica de interacción: establece la interacción del pH al adicionar dos o más variables del estudio.
- Regresión múltiple: en función de las variables estudiadas se establece un modelo de regresión con minimización para determinar el tiempo en el que incurre la menor cantidad de pH.

El análisis estadístico se realizó con el Software Minitab18 con los siguientes resultados:

Gráfica no.5 Gráfica de efectos principales



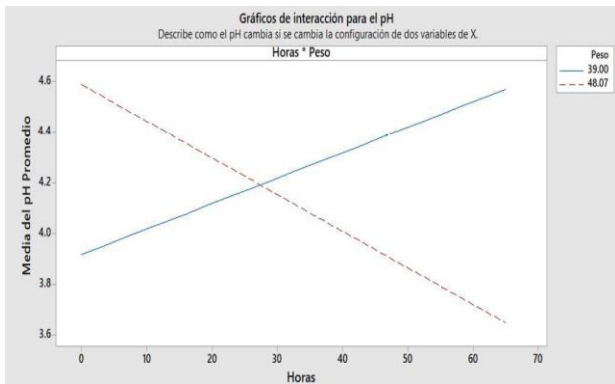
El pH es proporcional al incremento de los grados brix mientras el tiempo y el peso es inverso esta tendencia establece la probabilidad que las bacterias generadoras de ácido láctico puedan disminuir.

# Planificación y Sistemas de control de variables para la Fermentación del café en Guatemala.

**Fecha de recepción: 10 junio del 2023**

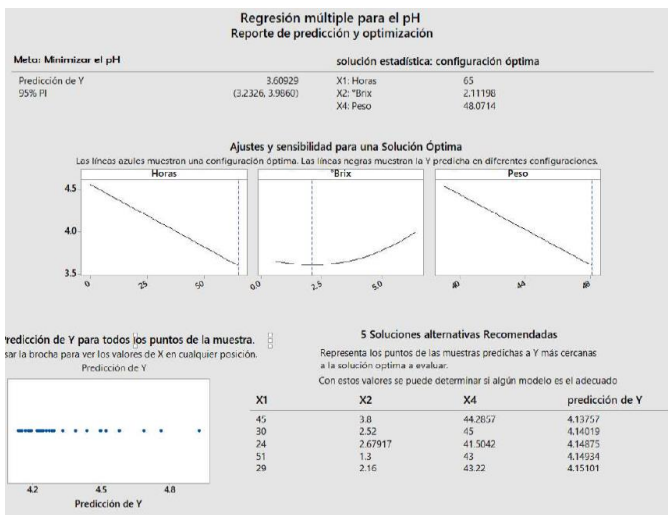
**Fecha de corrección: 28 julio 2023**

**Gráfica no.6** Gráfica de interacción para el pH.



Se establece una prueba de regresión al multiplicar las horas y el peso respecto a los grados brix

**Gráfica no.7** Modelo de regresión múltiple para el pH



El modelo identifica el mejor factor y a través de un modelo de optimización, en este caso para determinar el valor mínimo del pH se establecieron las mejores predicciones del modelo matemático en función al tiempo, °brix y Peso.

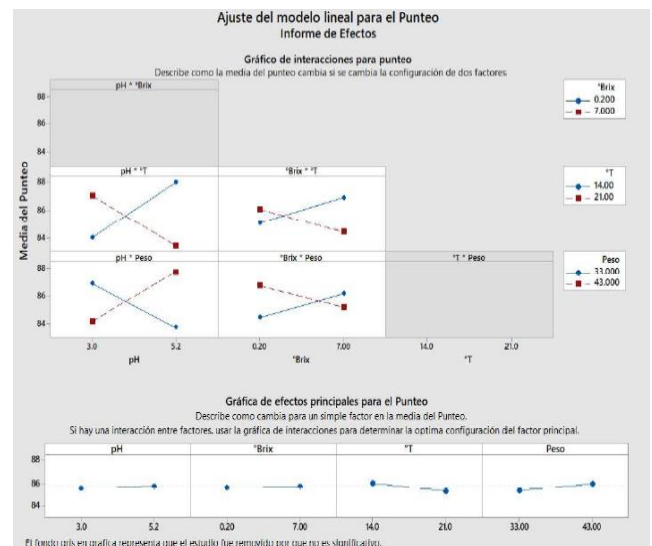
Una vez establecido el tiempo optimo para fermentar el café es importante evaluar el efecto del café producido en función del punteo de catación, para ello se emplea el diseño de experimentos (DOE) con el fin de tener un control de variables que puedan maximizar el resultado organoleptico de catación en el tiempo establecido con el modelo de regresión. El

diseño de experimentos se establece de la siguiente forma:

- Gráfica de interacción: establece la interacción del pH al adicionar dos o más variables del estudio.
- Regresión múltiple: en función de las variables estudiadas se establece un modelo de regresión con minimización para determinar el tiempo en el que incurre el mayor puntaje de catación.
- DOE factorial: es un experimento diseñado para estudiar los efectos de varios factores que pueden tener una respuesta en común, permitiendo el estudio individual de la interacción de cada factor.

El análisis estadístico se realizo con el Software Minitab18 con los siguientes resultados:

**Gráfica no.8** Gráfico de interacciones para el punteo de catación



El ajuste de modelos es un gráfico de relaciones que determina el comportamiento de una variable respecto de la otra.

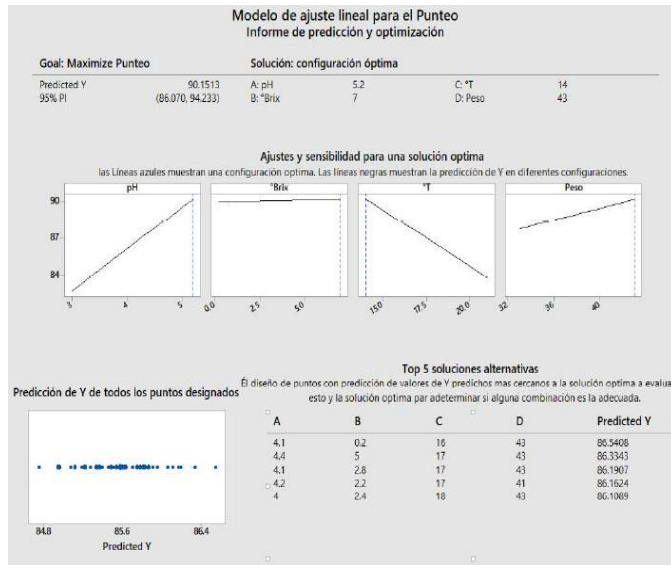
## Canalización del Conocimiento Científico

# Planificación y Sistemas de control de variables para la Fermentación del café en Guatemala.

Fecha de recepción: 10 junio del 2023

Fecha de corrección: 28 julio 2023

**Gráfica no.9** Gráfico de Predicción y maximización del punteo de catación.



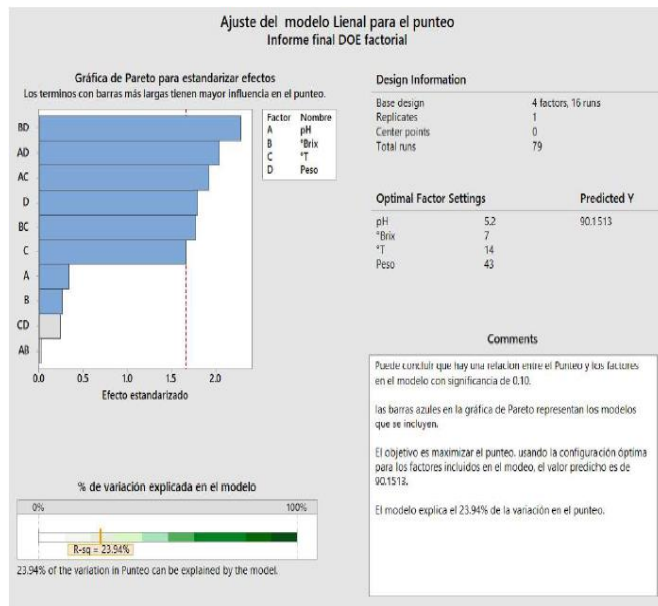
**tabla no.1** Propuesta de control de parametros establecidos por el DOE factorial.

Modeling Design: Data Collection Form for Block 1

RunOrder	pH	*Brix	*T	Peso	Punteo
1	5.2	7.0	21.0	33	_____
2	4.1	3.6	17.5	38	_____
3	5.2	0.2	21.0	33	_____
4	3.0	0.2	14.0	33	_____
5	5.2	0.2	14.0	43	_____
6	5.2	0.2	21.0	43	_____
7	3.0	7.0	21.0	43	_____
8	5.2	0.2	14.0	33	_____
9	3.0	7.0	21.0	33	_____
10	4.1	3.6	17.5	38	_____
11	3.0	0.2	21.0	43	_____
12	3.0	0.2	14.0	43	_____
13	3.0	7.0	14.0	33	_____
14	3.0	7.0	14.0	43	_____
15	5.2	7.0	21.0	43	_____
16	4.1	3.6	17.5	38	_____
17	3.0	0.2	21.0	33	_____
18	5.2	7.0	14.0	43	_____
19	5.2	7.0	14.0	33	_____

En este caso la función objetivo es maximizar el punteo de catación.

**Gráfica no.10** Diseño de experimentos Factorial.



Una propuesta de posibles combinaciones que puedan dar un buen punteo de catación.

Por último para poder sustentar la sugestión de que el pH mínimo representa un tiempo ideal para la fermentación se realiza un estudio microbiológico para determinar que bacterias se encuentran en el medio, de la siguiente forma:

- Preparación de la muestra:
- Se preparao 1 g de mucilago por 10 ml de agua peptonada
  - La muestra del café fue descongelada 1 semana después de la fermentación aeróbica.
  - Se realizaron las prácticas y preparación de agares cumpliendo con la normativa ISO 9308-1 de la siguiente forma:

El ajuste lineal establece la variabilidad del pronóstico y los parametros de diseño del DOE.

## Canalización del Conocimiento Científico

# Planificación y Sistemas de control de variables para la Fermentación del café en Guatemala.

Fecha de recepción: 10 junio del 2023

Fecha de corrección: 28 julio 2023

**Diagrama no.1** Elaboración del análisis microbiológico.



Procedimiento oficial de Merck para la determinación de MO.

El análisis microbiológico dio como resultado lo siguiente:

**tabla no.2** Resultados microbiológicos del mucílago del café.

Medio	Método	Resultado
Agar MRS	MERCK ISO 9308-1 (2014)	Positivo, bacterias generadoras de ácido láctico, Posible presencia de probióticos metabolizadores. UFC/placa: 127
Agar Papa Dextrosa		Positivo, presencia de levaduras que benefician el proceso de degradación del mucílago del café. UFC/placa : 76
Agar Manitol Salt		Positivo, cambio de coloración indica presencia de staphylococcus. UFC/placa = 4
Caldo de cerebro y corazón		Confirma la presencia de hongos por formación de hifas y estaphylococcus.

Sometido a 24 h de incubación

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para estimar el tiempo óptimo de la fermentación se realizó un modelo de comportamiento por regresión, el estudio preliminar fue en función al pH ya que tiene una tendencia cuadrática como se muestra en la gráfica no. 1 a diferencia de las otras variables, el pH alcanza el punto más bajo en cierto tiempo y luego sube, esto puede ser debido a un equilibrio químico entre la separación del mucílago por efecto de la fermentación y por la influencia microbiana en el medio que se verificó en el estudio microbiológico.

Se hizo un modelo de regresión del pH como objetivo minimizar o determinar el punto más bajo que puede alcanzar el sistema, y para aproximar el comportamiento se realizó el modelo de regresión incluyendo las otras variables.

La gráfica no. 5 expresa el comportamiento o la influencia de otras variables respecto al pH, el primer escenario indica que la relación del tiempo en función al pH es inversamente

proporcional esto quiere decir que a mayor tiempo el pH disminuye, la relación con los grados brix es de tendencia exponencial, esto indica que mayor cantidad de azúcares disueltos en la mezcla el pH puede aumentar.

Sin embargo, el exceso de sales disueltas en el sistema puede obstruir el crecimiento óptimo de bacterias que puedan degradar el mucílago del café.

Por último, el peso posee una ligera tendencia inversa lo que podría resultar que la calidad o tamaño del grano influye en la cantidad de nutrientes que permitan el crecimiento de bacterias en el sistema de fermentación como se demostró en el resultado microbiológico.

La gráfica 6 estima el mismo comportamiento al influir dos variables sobre el pH, escenario que indica dos posibilidades tanto la tendencia inversa como la directa por lo tanto el modelo

## Canalización del Conocimiento Científico



# Planificación y Sistemas de control de variables para la Fermentación del café en Guatemala.

**Fecha de recepción: 10 junio del 2023**

**Fecha de corrección: 28 julio 2023**

estadístico estable el punto de intersección de ambas gráficas para definir el modelo.

La gráfica 7 presenta el modelo final, con un intervalo de confianza al 95% se estima que las soluciones óptimas para fermentar el café, el modelo establecido para este estudio fue de 2 días y 17 horas para la fermentación óptima.

## **Mejores combinaciones para obtener un mayor punteo de catación** (Reta, y otros, 2017).

El diseño de experimentos es fundamental para realizar el estudio de comportamiento de variables, se realizó un diseño y modelado con el objetivo de encontrar la mejor combinación de control de fermentación para obtener mejores beneficios de catación.

Estadísticamente se estableció un programa de evaluación experimental como se muestra en la gráfica no.10 y un formato para el desarrollo de nuevas combinaciones (tabla no.1). Se debe considerar que los resultados a la propuesta experimental tienen un porcentaje de éxito del 80% para estimar una combinación ganadora que pueda mejorar la catación del producto.

El sistema de factoriales al ser de 4 recomienda un modelo experimental mínimo de 19 experimentos para obtener un resultado, sin embargo, se obtuvieron como resultado 79 experimentos en el transcurso del periodo 2018-2019 por lo que se procedió a realizar el análisis de interacción.

Los gráficos de interacción (Gráfica no.8) muestran cómo se comporta cada variable y que resultado se obtiene para definir un objetivo, para este caso la variable objetivo fue el punto de catación por lo que se hace un pronóstico a través del gráfico

sin embargo, el modelo de regresión no es una ecuación lineal o de una sola variable por lo que hay soluciones alternativas que deben considerarse y llevar a cabo en la experimentación para fijar un parámetro de fermentación óptimo al proceso en función al resultado de catación.

de efectos y se inicia el proceso de iteración en las gráficas 9 y 10, debe considerarse que el diseño de experimentos también se basa en sistemas o modelos de regresión para poder estimar la combinación ganadora, estadísticamente como se presenta en la tabla 1 hay 6 combinaciones que resultan ganadoras para un punteo de catación superior a los 85 puntos.

Es destacable que la combinación a pH 5.2 tiene un puntaje superior de 90 puntos en comparación al pronóstico alternativo, por lo tanto, es recomendable experimentar con los resultados sugeridos para potenciar el mejor resultado de procesamiento de café.

## **Bacterias beneficiadoras en el proceso de catación** (Puerta & Rios Arias, 2011).

El resultado de laboratorio (tabla no.2), da a entender lo siguiente:

- Bacterias generadoras de ácido láctico: son bacterias anaeróbicas que generalmente se encuentran en el intestino y boca de las personas, son resistentes a condiciones ácidas y son consideradas como probióticos, estas bacterias por procesamiento y degradación del mucilago son responsables de generar ácido láctico por lo que son bacterias que benefician el proceso de la fermentación del café.

# Planificación y Sistemas de control de variables para la Fermentación del café en Guatemala.

**Fecha de recepción: 10 junio del 2023**

**Fecha de corrección: 28 julio 2023**

De la misma forma alguna de estas bacterias que viven en tractos digestivos del ser humano benefician en la degradación propia del café.

- Las levaduras son fundamentales para metabolizar y acelerar el proceso de fermentación por lo que es fundamental mantener condiciones de temperatura mayores (condiciones mesófilas) para reducir el tiempo de fermentación del café.

- Staphylococcus: son bacterias patógenas responsables de la foliculitis y conjuntivitis, el Staphylococcus es responsable de destruir tejidos; en otras palabras, puede beneficiar al desprendimiento del mucílago, sin embargo, la concentración de este tipo puede representar peligro de generar toxinas al medio como una característica saprofita es decir que solo actúa en materia muerta.

Para evitar su proliferación debe evitarse la degradación prolongada de fermentación. El resultado es de 4 unidades formadoras de colonias por placa, por lo que se puede concluir que las condiciones del medio de fermentación impiden que estas bacterias proliferen.

Dando a entender que el café al sobrepasar su periodo de fermentación puede presentar problemas por proliferación de patógenos.

-Hongos y Staphylococcus: No hay confirmación definitiva de este tipo de microorganismos sin embargo hay que presentar precauciones ya que la visualización del medio es muy parecida a la salmonella, algunas cepas son inofensivas y funcionan como probióticos así que es probable que estas benefician el proceso de fermentación del café.

En el caso de los hongos son beneficiosos para el proceso de la fermentación, pero perjudiciales para el ser humano estéticamente, ya que son responsables de la infección de las uñas del ser humano.

El análisis microbiológico fue determinante para comprobar la importancia del pH en el sistema de fermentación como las otras variables, es por ello que el estudio se centró en establecer el tiempo óptimo de fermentación en función del pH ya que todas las bacterias generadoras de medios ácidos completan la degradación del sistema al alcanzar el punto mínimo de la fermentación, pasado de ese punto comienzan a oxidarse los alcoholes generados formando ácido acético que no es bien percibido organolépticamente en taza, por lo tanto es recomendable realizar un estudio de cuantificación para determinar la sustancia de mayor concentración en el sistema.

## CONCLUSIONES

- El tiempo óptimo de fermentación óptimo se concluirá en función a los resultados obtenidos del modelo matemático de regresión, siendo la combinación de 2 días y 3 horas para este estudio la más aceptada en función a las pruebas experimentales realizadas.
- El sistema recomienda una mayor concentración de °Brix para la fermentación del café Y garantizar un buen punteo en catación.
- La mejor combinación para un resultado óptimo e catación fue con un pH de fermentación de 5.2 sin

**Canalización del Conocimiento Científico**

# Planificación y Sistemas de control de variables para la Fermentación del café en Guatemala.

**Fecha de recepción: 10 junio del 2023**

**Fecha de corrección: 28 julio 2023**

embargo, las combinaciones de 4 también resultan efectivas.

- El peso del grano influye en sus propiedades organolépticas que

## RECOMENDACIONES

- Equipo de seguridad (guantes y mascarilla) durante la manipulación del fermento para evitar enfermedades en la piel o al contacto.
- Realizar los experimentos sugeridos en la tabla no.1 para mejorar el diseño de experimentos y determinar la mejor combinación.
- Tomar más datos estadísticos para estandarizar el proceso y tener una mejor predicción.
- Realizar un análisis de composiciones químicas para

## AGRADECIMIENTOS

- Ing. Fernando Díaz – por el apoyo, formación y la oportunidad de realizar la investigación para el desarrollo de la caficultura en el país.
- Ing .Jorge Luis Monsteroso – por el aporte y apoyo para poder desarrollar el proyecto.
- Maestro en Catación Jorge de Leon – por su evaluación y apoyo en los resultados de catación para la investigación.

son fundamentales en la fermentación por los nutrientes que pueda tener para la carga bacteriana.

determinar el compuesto de mayor concentración y analizar que bacteria es causante de ese producto, entre los métodos recomendados están:

- A.O.A.C 935.24,27
- A.O.A.C 969.12
- A.O.A.C 31.034/84, 923.09
- A.O.A.C 990.08
- Realizar análisis microbiológicos anuales para llevar un control de bacterias que proliferan en el medio.

- Anacafé – por la oportunidad de poder hacer las evaluaciones de catación y la capacitación sobre la caficultura guatemalteca.
- Tec y Facultad de Ingeniería de la Universidad Rafael Landivar – Por el apoyo para poder realizar la investigación y el análisis microbiológico.

# Planificación y Sistemas de control de variables para la Fermentación del café en Guatemala.

Fecha de recepción: 10 junio del 2023

Fecha de corrección: 28 julio 2023

## Bibliografía

Anacafe. (12 de Abril de 2019). Obtenido de Revista el Cafetal: <https://www.anacafe.org/caficultura/revista-el-cafetal>

Puerta Quintero, G. I., & Echeverry Molina, J. G. (2015). Fermentación Controlada del café: Tecnología para agregar valor a la calidad. *Avances Técnicos: Cenicafé*, 12.

Puerta, G. I., & Rios Arias, S. (2011). Composición Química del café según el tiempo de Fermentación y Refrigeración. *Cenicafé*, 40.

Puerta Quintero, G. I. (2012). Factores, Procesos y Controles en la Fermentación del Café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 12.

Reta, Mursalim, Salengke, Junaedi, M., Mariati, & Sopade, P. (2017). Reducing the acidity of Arabica Coffee beans by ohmic fermentation technology. *Food Research*, 160.