

Experimental Evaluation of Coffee Extraction Times: Integrating Statistical Analysis in Engineering Education

María Elizabeth Puelles Bulnes, Dr¹, V.A.A. Espinoza, Dr.², Angie L. Atoche Puelles, M.SC³

¹Ricardo Palma University, Lima-Perú, maria.puellesb@urp.edu.pe, ²National Major San Marcos University, Perú, vatochee@unmsm.edu.pe,

³Federal University of Minas Gerais, Brazil, aapuelles@ufmg.br

Abstract

The objective of this study is to analyse whether there are significant differences in coffee extraction times based on different commercial methods: filtration, evaporation, and immersion. To achieve this, a bifactorial experimental design was employed, using three types of coffee makers (Italian, French press, and drip filter) and three varieties of coffee from well-known brands in the Peruvian market. To ensure the validity of the statistical model assumptions, normality, homoscedasticity, and independence of residuals tests were conducted. The results showed a significant difference in extraction times with a 95% confidence level. Additionally, a post hoc Tukey and LSD (Least Significant Difference) analysis was applied with a significance level of $\alpha = 0.05$, identifying significantly different mean pairs and determining which method exhibited the longest extraction time. The findings indicate that the extraction method, particularly pressure and evaporation, is the primary factor influencing coffee preparation time, while the coffee brand has minimal impact. Among the evaluated extraction methods, evaporation, represented by the Italian coffee maker, proved to be the most efficient. In contrast, filtration, associated with the drip filter coffee maker, resulted in the longest extraction time. Meanwhile, immersion, represented by the French press, demonstrated greater stability in preparation times. From a sensory and chemical perspective, the research highlights that extraction times influence the essence, quality, body, and aroma of the final coffee. Furthermore, it was found that inadequate extraction can generate undesirable flavors, such as excessive acidity with short extraction times or pronounced bitterness with prolonged extractions. This study not only contributes to the understanding of optimal coffee preparation but also serves as a practical case study in engineering education. The implementation of experimental methodologies, statistical data analysis, and process optimization in this work provides a useful didactic approach for disciplines such as chemical engineering, food engineering, and industrial engineering. The experimental design applied in this research allows students to comprehend the importance of variable control, process modelling, and evidence-based decision-making. Moreover, it fosters critical thinking and innovation by exploring how small variations in extraction methods can significantly impact the quality of the final product. This study also offers valuable contributions to the gastronomic and commercial sectors and serves as an educational tool in teaching process optimization, statistical analysis, and the application of the scientific method in engineering.

Keywords

Coffee extraction method, experimental design, statistical analysis, engineering education.

Evaluación Experimental de los Tiempos de Extracción de Café: Integración del Análisis Estadístico en la Educación en Ingeniería

María Elizabeth Puelles Bulnes, Dr.¹, V.A.A. Espinoza, Dr.², Angie L. Atoche Puelles, M. Sc.³

¹Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú, maria.puellesb@urp.edu.pe, ²Universidad Mayor de San Marcos, Lima-Perú, vatochee@unmsm.edu.pe, ³Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, aapuelles@ufmg.br

Resumen- El objetivo de este estudio es analizar si existen diferencias significativas en los tiempos de extracción del café según distintos métodos comerciales: filtrado, evaporación e inmersión. Para ello, se utilizó un diseño experimental bifactorial, empleando tres tipos de cafeteras (italiana, francesa y de filtro) y tres variedades de café de marcas reconocidas en el mercado peruano. Para garantizar la validez de los supuestos del modelo estadístico, se realizaron pruebas de normalidad, homocedasticidad e independencia de residuos. Los resultados mostraron una diferencia significativa en los tiempos de extracción con un nivel de confianza del 95%. Además, se aplicó un análisis post hoc de Tukey y DMS con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, identificando los pares de medias significativamente diferentes y determinando qué método presenta el mayor tiempo de extracción. Los hallazgos indican que el método de extracción de presión y por evaporación es el principal factor que influye en el tiempo de preparación del café, mientras que la marca del café tiene un impacto mínimo. Entre los métodos de extracción evaluados, la evaporación, representada por la cafetera italiana, resultó ser la más eficiente. En contraste, la filtración, asociada con la cafetera de filtro, presentó el mayor tiempo de extracción. Por otro lado, la inmersión, representada por la cafetera francesa, mostró mayor estabilidad en los tiempos de preparación. Desde una perspectiva sensorial y química, la investigación evidencia que los tiempos de extracción influyen en la esencia, calidad, espesor y fragancia del café final. Además, se encontró que una extracción inadecuada puede generar sabores no deseados, como una acidez excesiva en tiempos cortos o un amargor pronunciado en extracciones prolongadas. Este estudio no solo contribuye al conocimiento sobre la preparación óptima del café, sino que también representa un caso de aplicación práctica en la enseñanza de la ingeniería. La implementación de metodologías experimentales, el análisis de datos estadísticos y la optimización de procesos en este trabajo ofrecen un enfoque didáctico útil para disciplinas como la ingeniería química, la ingeniería en alimentos y la ingeniería industrial. El diseño experimental aplicado en esta investigación permite a los estudiantes comprender la importancia del control de variables, la modelización de procesos y la toma de decisiones basada en evidencia empírica. Además, se fomenta el pensamiento crítico y la capacidad de innovación al explorar cómo pequeñas variaciones en los métodos de extracción pueden impactar significativamente en la calidad del producto final. El trabajo también es un aporte al sector gastronómico y comercial y también sirve como herramienta educativa en la enseñanza de la optimización de procesos, el análisis estadístico y la aplicación del método científico en la ingeniería.

Palabras clave-- Extracción de café, diseño experimental, análisis estadístico, educación en ingeniería

I. INTRODUCCIÓN

La calidad del café está influenciada significativamente por el método de extracción, lo que afecta su sabor, aroma y textura [1][2]. A pesar de la importancia de estos factores, existe una notable carencia de análisis estadísticos rigurosos sobre los tiempos de extracción [3][4]. Diversos métodos de extracción presentan perfiles sensoriales distintos. Por ejemplo, el café de cold brew y el espresso poseen diferencias en su actividad antioxidante y compuestos volátiles [4] y [5]. Asimismo, la uniformidad de la molienda y la duración del proceso influyen directamente en la eficiencia de extracción y en la calidad de la bebida [6]. Modelos cinéticos avanzados han sido desarrollados para predecir cómo los parámetros de extracción afectan los componentes del sabor, destacando la necesidad de un control preciso sobre las condiciones de preparación [6].

Si bien algunos estudios han empleado métodos estadísticos para analizar la calidad del café, los análisis exhaustivos centrados específicamente en los tiempos de extracción siguen siendo escasos [7]. La falta de investigaciones rigurosas en este aspecto limita la capacidad de optimizar las prácticas de preparación, lo que resalta la necesidad de aplicar herramientas estadísticas en este campo.

El trabajo realizado en este estudio sobre los métodos de extracción del café está directamente relacionado con la importancia de alcanzar el nivel óptimo de extracción para mejorar el sabor de la bebida. Los resultados obtenidos en [8] y [9] muestran que, según la teoría de extracción, un tiempo de extracción demasiado corto puede provocar subextracción, resultando en un sabor más ácido, mientras que un tiempo excesivo puede causar sobreextracción, dando lugar a un sabor amargo. Esta perspectiva sugiere que la experimentación con los tiempos de extracción, junto con el ajuste del tamaño de la molienda, puede generar perfiles sensoriales únicos y deseables en la preparación del café. El tamaño de la molienda es importante para lograr una distribución óptima de las partículas, lo que a su vez influye en la eficiencia de extracción al afectar las tasas de flujo y solubilidad [10] [11]. Si bien el enfoque suele centrarse en alcanzar la extracción ideal, también es fundamental reconocer que las preferencias personales y las influencias culturales desempeñan un papel significativo en la definición de lo que constituye la "taza de café perfecta" [12].

Los resultados del estudio no solo permiten identificar qué método es más eficiente en términos de tiempo, sino que también

brindan información relevante para ajustar los parámetros de extracción y mejorar el sabor del café [13].

Por otro lado, la integración del análisis estadístico en la educación en ingeniería, particularmente a través de la evaluación experimental de los tiempos de extracción de café, resalta la importancia de los métodos empíricos para la comprensión de procesos complejos. Este enfoque no solo mejora la experiencia de aprendizaje, sino que también proporciona a los estudiantes habilidades prácticas en análisis de datos y diseño experimental, fundamentales en la formación de ingenieros. Desde una perspectiva educativa, la incorporación de experimentos de extracción de café en el laboratorio del curso de Diseño de Experimentos en la carrera de Ingeniería Industrial en la Universidad Ricardo Palma permitió a los estudiantes aplicar técnicas estadísticas en escenarios reales, fomentando el pensamiento crítico y las habilidades de resolución de problemas [21]. Además, la toma de decisiones basada en datos se vuelve una competencia esencial, ya que los estudiantes aprenden a interpretar la información y fundamentar sus conclusiones en evidencia estadística.

Si bien el análisis de la extracción de café proporciona un caso de estudio relevante, es fundamental reconocer sus implicaciones en un contexto más amplio. La aplicación del análisis estadístico en diversas áreas de la ingeniería no solo fortalece el aprendizaje, sino que también mejora la preparación de los futuros profesionales para enfrentar los retos o desafíos de la industria actual.

II. OBJETIVO

El objetivo de este estudio es analizar si existen diferencias significativas en los tiempos de extracción del café según distintos métodos comerciales: filtrado, evaporación e inmersión. Para ello, se utilizó un diseño experimental bifactorial, empleando tres tipos de cafeteras (italiana, francesa y de filtro) que representan estos métodos, junto con tres variedades de café de marcas reconocidas en el mercado peruano. Además, se evaluó experimentalmente la variabilidad en los tiempos de extracción mediante el ANOVA y post hoc, con el propósito de analizar la influencia de los métodos de preparación en la calidad del café. La implementación de metodologías experimentales, el análisis de datos estadísticos y la optimización de procesos en este estudio ofrecen un enfoque didáctico útil para disciplinas como la ingeniería química, la ingeniería en alimentos y la ingeniería industrial. Este análisis también se integra en la educación en ingeniería, demostrando la aplicabilidad del diseño experimental en procesos cotidianos.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

Diversos estudios han demostrado el valor de los métodos estadísticos en la optimización de la extracción de café. Por ejemplo, el uso de diseños factoriales ha permitido evaluar el impacto de factores como el tamaño de molienda, el tipo de tueste y el tiempo de inmersión en la concentración de sólidos disueltos totales (TDS) en la bebida final [14]. El Análisis de Varianza (ANOVA) Unifactorial ha sido empleado para evaluar

la estabilidad del flujo de café, demostrando la efectividad de estos métodos en la mejora de los procesos de preparación [9]. Los estudios sobre el tiempo de extracción del café revelan conocimientos significativos sobre la optimización de los procesos de extracción, destacando la importancia de varios parámetros como el tiempo, la temperatura, tipo de café, agua y el tipo de disolvente [15] y [16]. Estos estudios emplean métodos estadísticos para analizar los efectos de estas variables en los rendimientos y la calidad de la extracción, proporcionando un marco robusto para comprender la dinámica de la extracción del café. En [17], plantea el estudio del factor que influye es el tiempo de extracción del café. En el caso de [18], expone que la temperatura y disolvente son importantes. Por el contrario, aunque estos estudios enfatizan la optimización de los procesos de extracción, también resaltan el potencial de variabilidad en los resultados en función de los diferentes tipos de café y métodos de extracción, lo que sugiere la necesidad de más estudios referente al tema, incluyendo otras variables relevantes.

IV. METODOLOGIA

A. Principios del Diseño Experimental

1) *Aleatorización*: Es un principio fundamental en el Diseño de Experimentos, ya que garantiza la validez del estudio al permitir que todas las unidades experimentales tengan las mismas condiciones para cualquier tratamiento. Este proceso asegura que la asignación de tratamientos sea completamente aleatoria, otorgando a cada unidad experimental la misma probabilidad de recibir cualquier tratamiento [19] [20].

Además, la aleatorización ayuda a eliminar cualquier tipo de correlación que pueda existir entre las unidades experimentales, proporcionando así una prueba válida de significación estadística. En los casos donde los errores asociados a las unidades experimentales están correlacionados, una correlación positiva puede generar una mayor varianza en los tratamientos en comparación con aquellos evaluados de forma independiente [20].

2) *Replicación*: Consiste en asignar el mismo tratamiento a múltiples unidades experimentales. Su principal objetivo es obtener una estimación del error experimental, lo cual requiere la comparación de unidades experimentales que han sido tratadas de la misma manera, pero que, antes del experimento, presentaban condiciones distintas. Además de proporcionar una estimación del error experimental, la replicación mejora la precisión del experimento al reducir los errores estándar asociados con la comparación de tratamientos. Es importante considerar que, aunque un mayor número de replicaciones conlleva una mayor precisión, estas no pueden incrementarse indefinidamente. Cuando los costos de la experimentación superan los beneficios de la reducción de la varianza, un incremento adicional en el número de replicaciones deja de ser eficiente [19] y [20].

3) *Bloqueo*: Es una técnica utilizada en el Diseño Experimental para reducir la variabilidad no controlada del entorno experimental, ya que controlar de manera precisa todos los factores ambientales puede ser costoso y poco práctico. El control local se encarga de eliminar los efectos de fuentes de variación desconocidas y con alta variabilidad. El bloqueo

consiste en agrupar las unidades experimentales en conjuntos homogéneos basados en características específicas de los factores de clasificación. Posteriormente, los tratamientos se asignan dentro de cada bloque siguiendo una estructura predefinida [19]. El bloqueo debe realizarse de manera que se asocien las unidades experimentales a fuentes de variación extrema, lo que permite eliminar factores extraños y mejorar la precisión en la estimación del error experimental. Esto, a su vez, incrementa la eficiencia del experimento al reducir las diferencias entre tratamientos. En el presente estudio, no se han aplicado variables de bloqueo, ya que no se consideró necesario.

B. Variables del modelo

Para la extracción de café utilizando diversos métodos, con diferentes cafeteras. Se ha considerado al tiempo que toma cada extracción como la variable de interés necesaria para el experimento y análisis. Esta variable nos indicará de forma específica que cambios significativos encontraremos al variar las marcas de café molido y los medios para obtenerlo.

Variable Respuesta (o interés): Tiempo de extracción del café.

Para el desarrollo del experimento se ha considerado el método de extracción del café (Factor A), considerado a la cafetera francesa (inmersión), cafetera de filtro (filtrado por goteo) y cafetera italiana (evaporación); mientras que marca de café (Factor B), utilizando el café orgánico molido, tales como: Café 1, Café 2 y Café 3.

Factor A: Método de extracción del café.

Niveles: Cafetera italiana, cafetera francesa y cafetera de filtro

Factor B: Marca de café orgánico molido.

Niveles: Café 1, Café 2, Café 3.

Debido a restricciones de confidencialidad y derechos de marca, los nombres comerciales de los cafés no pueden ser mencionados en este estudio.

C. Diseño de Experimento Bifactorial

En el presente trabajo está basado en la aplicación del diseño bifactorial [19] y [22], utilizando como factores tres métodos de extracción del café y tres marcas de café orgánico molido, lo cual nos permitirá obtener una variable respuesta, en este caso, el tiempo de extracción del café.

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad (1)$$

$i=1,2, \dots a; j=1,2, \dots b; k=1,2, \dots n$

donde:

Y_{ijk} : Observación en la celda ij

μ : Media global o total

τ_i : Efecto del nivel i -ésimo del factor A

β_j : Efecto del nivel j -ésimo del factor B

ϵ_{ijk} : Error atribuible a la medición

a : Total de niveles del factor A

b : Total de niveles del factor B

n : Total de réplicas por celda

$N: a*b*n$, es decir total de datos

1) Hipótesis de la Investigación

Factores Principales

H0: El Factor A no influye en la variable de interés.

H1: El Factor A influye en la variable de interés.

H0: El Factor B no influye en la variable de interés.

H1: El Factor B influye en la variable de interés.

2) Factor doble

H0: El Factor A y B no influyen en la variable de interés.

H1: El Factor A y B influyen en la variable de interés.

D. Análisis de Varianza (ANOVA)

Para establecer el nivel de significancia (α), consideremos el valor de α para proyectos de investigación: 0.05. El ANOVA es una herramienta útil que sirve para analizar nuestros cálculos con relación a la variabilidad de nuestros factores A, B y la interacción AB; es fundamental para calcular sus valores estadísticos F para poder contrastar las hipótesis, como se muestra las fórmulas en la Tabla 1:

Tabla 1
Anova – Diseño Bifactorial

Fuentes	Suma cuadrados	Grados libertad	Cuadrados medios	F
Factor A	SCA	$a - 1$	$MCA = SCA/(a-1)$	$FA = MCA/MCE$
Factor B	SCB	$b - 1$	$MCB = SCB/(b-1)$	$FB = MCB/MCE$
Interacción	SCAB	$(a - 1)(b - 1)$	$MCAB = SCAB/(a-1)(b-1)$	$FAB = MCAB/MCE$
Residual	SCE	$ab(n - 1)$	$MCE = SCE/ab(n-1)$	
Total	SCT	$abn - 1$		

En la Tabla 1, se utilizan varios conceptos clave para descomponer y analizar la variabilidad de los datos. Entre ellos, destacan la Suma de Cuadrados (SC), los Grados de Libertad (GL) y los Cuadrados Medios (MC). A continuación, se explica cada uno:

1) *Suma de Cuadrados (SC)*: Representa la variabilidad total de los datos y se descompone en diferentes componentes dependiendo de los factores analizados en el experimento. Se calcula elevando al cuadrado las diferencias entre los valores observados y sus respectivas medias.

Se divide en:

Suma de Cuadrados Total (SCT): Mide la variabilidad total de los datos con respecto a la media global.

Suma de Cuadrados del Factor A (SCA): Explica la variabilidad debida a los niveles del factor A.

Suma de Cuadrados del Factor B (SCB): Explica la variabilidad debida a los niveles del factor B.

Suma de Cuadrados de la Interacción (SCAB): Explica la variabilidad atribuida a la interacción entre los factores A y B.

Suma de Cuadrados del Error o Residual (SCE): Representa la variabilidad no explicada por los factores, es decir, la variabilidad debida a errores aleatorios. La relación entre estas sumas de cuadrados es:

$$SCT = SCA + SCB + SCAB + SCE \quad (2)$$

2) *Grados de Libertad (GL)*: Representan el número de valores independientes que pueden variar en el cálculo de una estadística

sin perder información. Para cada componente en ANOVA, se asignan los siguientes grados de libertad:

GL del Factor A: $a-1$, (donde a es el número de niveles del factor A).

GL del Factor B: $b-1$, (donde b es el número de niveles del factor B).

GL de la Interacción $A \times B$: $(a-1)(b-1)$.

GL del Error o Residual: $ab(n-1)$, (donde n es el número de repeticiones por combinación de niveles).

GL Total: $abn-1$, qué es la suma de todos los grados de libertad.

Los grados de libertad ayudan a determinar la variabilidad esperada dentro de los datos y son fundamentales para la construcción de la prueba F en ANOVA.

3) Cuadrados Medios (CM): Se obtiene dividiendo SC correspondiente entre sus respectivos GL. Representa una estimación de la varianza para cada fuente de variación. Los CM se utilizan para calcular los valores F en ANOVA, comparando la variabilidad explicada por cada factor con la variabilidad del error.

Estos tres conceptos son clave para interpretar los resultados de un ANOVA y determinar si los factores analizados tienen un efecto significativo en la variable de respuesta.

Por otro lado, para realizar el contraste de las hipótesis, para los factores se deben calcular y analizar su valor estadístico F o su p_{valor} . Para aceptar o rechazar la hipótesis nula (H_0) mediante el p_{valor} se basa en lo siguiente:

Si el $p_{\text{valor}} > \alpha$, entonces se acepta H_0 .

Si el $p_{\text{valor}} < \alpha$, entonces no se acepta H_0 .

En el caso del valor estadístico F (F_{calc}), se debe calcular con ayuda de la tabla ANOVA y los grados de libertad para encontrar el F crítico (F_c) con ayuda de la tabla de distribución F, ver Fig. 1.

Se observa que:

Si $F_{\text{calc}} < F_c$, entonces se acepta H_0 .

Si $F_{\text{calc}} > F_c$, entonces se rechaza H_0 .

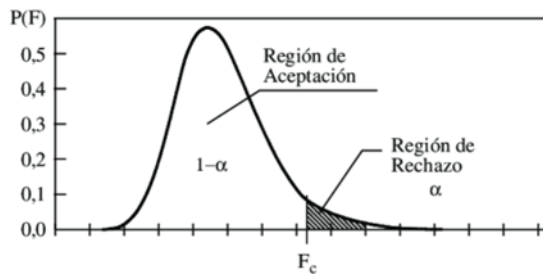


Fig.1: Distribución de Fisher

E. Materiales

Para el desarrollo del experimento, se seleccionaron tres tipos de café molido de origen peruano, reconocidos por su prestigio en el mercado. Debido a restricciones de confidencialidad y derechos de marca, los nombres comerciales de los cafés no pueden ser mencionados en este estudio. No obstante, se garantiza que los cafés seleccionados presentan características similares en procesamiento y certificaciones, asegurando condiciones homogéneas para la comparación de los métodos de extracción.

Además, se emplearon tres tipos de cafeteras representativas de diferentes métodos de extracción: Cafetera italiana: Método basado en presión y evaporación. Prensa francesa: Método de inmersión que permite un contacto prolongado entre el café molido y el agua. Cafetera de filtro: Método de filtrado por gravedad que regula la velocidad de extracción.

Los experimentos se llevaron a cabo bajo condiciones controladas, asegurando la misma proporción de café y agua en cada método para minimizar posibles sesgos en los tiempos de extracción y en las propiedades sensoriales evaluadas.

En este estudio se analizaron tres métodos de extracción de café: filtrado, evaporación e inmersión, utilizando diferentes tipos de cafeteras. Para la extracción por filtrado, se utilizó una cafetera de goteo, iniciando con el calentamiento del agua a 100°C , seguido de la colocación de 20 g de café en el filtro y 250 ml de agua caliente en el compartimento posterior.

En el caso de la extracción por evaporación, se empleó una cafetera italiana. El procedimiento comenzó con el llenado del depósito inferior con agua fría hasta la válvula de seguridad. Luego, se colocaron 20 g de café molido en el embudo y se cerró la cafetera, ubicándola sobre la hornilla encendida hasta completar la extracción.

Finalmente, para la extracción por inmersión, se utilizó una cafetera francesa. Se inició el proceso añadiendo 20 g de café, seguido de una pequeña cantidad de agua caliente para hidratar el contenido. Posteriormente, se llenaron $\frac{3}{4}$ partes de la cafetera con agua a 100°C y se finaliza presionando el pistón junto a la tapa para completar la extracción.

F. Matriz de orden de las unidades experimentales

La formación de estos datos sigue una estructura ordenada y organizada para facilitar el análisis estadístico en el experimento. Cada unidad experimental ha sido numerada secuencialmente, lo que permite identificar de manera única cada observación dentro del diseño del estudio.

Además, los datos están agrupados por combinación de factores (A y B), lo que indica que cada combinación representa una condición experimental específica. Esto es fundamental en un diseño de experimentos, ya que permite evaluar el efecto de los diferentes tratamientos sobre la variable respuesta, ver Tabla 2.

La inclusión de una variable de respuesta numérica asociada a cada combinación de factores posibilita el análisis comparativo

de los efectos de los diferentes tratamientos. Esta disposición estructurada es clave para aplicar métodos estadísticos como ANOVA, analizar la variabilidad entre grupos y validar la aleatorización del experimento.

En general, este formato de datos permite no solo una mejor interpretación de los resultados, sino que también garantiza la reproducibilidad del estudio y la precisión en los cálculos estadísticos.

Tabla 2. Valores de unidades experimentales en forma aleatoria.

Unidad Experimental	Combinación
1	A1B2
2	A2B2
3	A3B2
4	A2B1
5	A2B3
6	A3B3
7	A1B1
8	A1B3
9	A3B1
10	A3B2
11	A1B3
12	A2B2
13	A1B1
14	A1B2
15	A2B1
16	A2B3
17	A3B1
18	A3B3

V. RESULTADOS

A. Resultado del Anova

Los datos obtenidos en el experimento con dos réplicas reflejan los valores de la variable respuesta, que representa una característica clave del café extraído en cada combinación de factores. La estructura de los datos se presenta en una matriz experimental, donde se organizan de manera sistemática para su análisis estadístico, ver Tabla 3.

Los resultados obtenidos en la Tabla 4:

i) *Efecto del tipo de café*: No se encontró un efecto significativo del factor café sobre el tiempo de extracción ($p_valor = 0.908 > 0.05$). Esto sugiere que las marcas de café utilizadas no influyen de manera relevante en el tiempo de extracción.

Tabla 3. Matriz experimental

Marcas de Café	Italiana		Por Filtro		Francesa	
café 1	3.13	2.48	4.14	4.07	5.39	4.21
café 2	3.08	3.48	4.1	4.11	4.18	5.07
café 3	3.11	2.59	4.05	4.15	5.02	4.58

ii) *Efecto del tipo de cafetera*: Se encontró un efecto altamente significativo del tipo de cafetera sobre el tiempo de extracción ($p_valor = 0 < 0.05$). Este resultado indica que la cafetera utilizada influye de manera determinante en el tiempo de extracción del café.

Tabla 4: Resultado del Anova

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: TIEMPO_EXTR

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo	289,463 ^a	9	32,163	178,351	,000
CAFE	,035	2	,018	,098	,908
CAFETERA	9,565	2	4,782	26,520	,000
CAFE * CAFETERA	,281	4	,070	,389	,812
Error	1,623	9	,180		
Total	291,086	18			

a. R al cuadrado = .994 (R al cuadrado ajustada = .989)

3) *Interacción café × cafetera*: No se encontró una interacción significativa entre los factores café y cafetera ($p_valor = 0.812 > 0.05$). Esto sugiere que el efecto del tipo de cafetera en el tiempo de extracción no depende de la marca de café utilizada.

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.994$ indica que el modelo explica el 99.4% de la variabilidad en los tiempos de extracción, lo que evidencia un ajuste adecuado del modelo estadístico.

B. Resultado del Análisis de los Post Hoc

El análisis Post Hoc se utiliza cuando se rechaza H_0 en el ANOVA, para descubrir en cual nivel es significativo. El método de Tukey y DMS nos permite identificar qué métodos de extracción presentan diferencias estadísticamente significativas en el tiempo de extracción, ver Tabla 5.

1) *Prueba de Tukey HSD*: Se observa lo siguiente:

i) El método de extracción italiano tiene un tiempo de extracción significativamente menor en comparación con el método por filtro (Diferencia = -1.7633, $p < 0.001$), con un intervalo de confianza del 95% entre -2.4479 y -1.0788.

ii) La extracción italiana también es significativamente más rápida que la francesa (Diferencia = -1.1250, $p = 0.003$), con un intervalo de confianza entre -1.8095 y -0.4405.

iii) No se encontraron diferencias significativas entre los métodos francés y por filtro (Diferencia = -0.6383, $p = 0.067$), lo que sugiere que estos dos métodos tienen tiempos de extracción similares.

2) *Prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS)*: Los resultados de la prueba DMS confirman los hallazgos de la prueba de Tukey:

i) El método de extracción por filtro es el más lento, con un tiempo de extracción significativamente mayor en comparación con los métodos italiano y francés.

ii) La cafetera italiana presenta el menor tiempo de extracción, con diferencias significativas en comparación con los otros dos métodos.

Tabla 5. Comparaciones múltiples con método Tukey y DMS - SPSS

Comparaciones múltiples							
Variable dependiente: TIEMPO EXTR							
(I) MÉTODO EXTRACCIÓN		(J) MÉTODO EXTRACCIÓN	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Limite inferior	Limite superior
HSD Tukey	ITALIANA	FRANCESA	-1,1250 ^a	,24518	,003	-1,8095	-,4405
		POR FILTRO	-1,7633 ^a	,24518	,000	-2,4479	-,0788
	FRANCESA	ITALIANA	1,1250 ^a	,24518	,003	,4405	1,8095
		POR FILTRO	-,6383 ^a	,24518	,067	-1,3229	,0462
	POR FILTRO	ITALIANA	1,7633 ^a	,24518	,000	1,0788	2,4479
		FRANCESA	,6383 ^a	,24518	,067	-,0462	1,3229
DMS	ITALIANA	FRANCESA	-1,1250 ^a	,24518	,001	-1,6796	-,5704
		POR FILTRO	-1,7633 ^a	,24518	,000	-2,3180	-,12087
	FRANCESA	ITALIANA	1,1250 ^a	,24518	,001	,5704	1,6796
		POR FILTRO	-,6383 ^a	,24518	,029	-1,1930	-,0837
	POR FILTRO	ITALIANA	1,7633 ^a	,24518	,000	1,2087	2,3180
		FRANCESA	,6383 ^a	,24518	,029	,0837	1,1930

Se basa en las medias observadas.
El término de error es la media cuadrática(Error) = ,180.
*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

iii) Se observa una tendencia de mayor tiempo de extracción en la cafetera de filtro, aunque en la comparación con la prensa francesa, la diferencia es menor y estadísticamente marginal ($p = 0.067$ en Tukey y $p = 0.029$ en DMS).

Los resultados de las pruebas de comparaciones múltiples confirman que el método de extracción tiene un efecto significativo en el tiempo de extracción del café. La cafetera italiana es el método más rápido, mientras que la cafetera de filtro requiere el mayor tiempo de extracción. La cafetera francesa presenta tiempos intermedios, con diferencias no significativas en comparación con la cafetera de filtro.

Estos hallazgos tienen implicaciones tanto en la industria cafetera como en el consumo cotidiano, ya que la elección del método de extracción puede influir en la eficiencia del proceso y en las propiedades del café final, como se comprueba en la Fig. 2.

En la Fig. 3, muestra las medias marginales estimadas del tiempo de extracción según el método de extracción (tipo de cafetera) y el tipo de café utilizado (Café 1, Café 2 y Café 3). Cada línea representa un método de extracción:

1) Se observa que el tiempo de extracción de la cafetera italiana, es el más bajo en comparación con los otros métodos, confirmando que la cafetera italiana es la más rápida. También presenta un ligero aumento en el tiempo de extracción en comparación con los otros dos cafés.

2) En la cafetera francesa, presenta un comportamiento estable, manteniendo un tiempo de extracción relativamente constante para las tres marcas de café. Esto indica que la cafetera francesa ofrece una extracción más homogénea, con menor variabilidad en los tiempos de preparación.

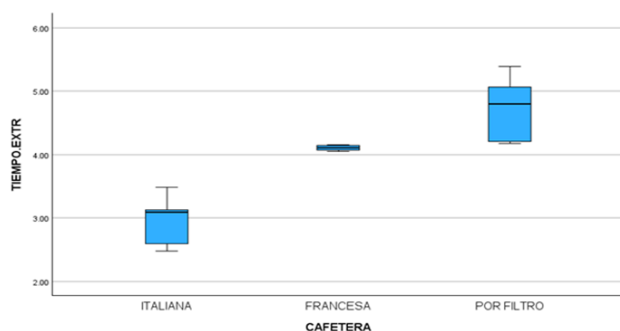


Fig 2. Diagrama de caja del tipo de cafetera y tiempo de extracción

3) En la cafetera por filtro, se observa que el tiempo de extracción es el más alto en comparación con los otros métodos, lo que confirma que la cafetera por filtro requiere más tiempo para la preparación del café.

Estos resultados refuerzan la importancia de seleccionar el método de extracción adecuado según la preferencia del consumidor y la optimización del tiempo de preparación en contextos comerciales.

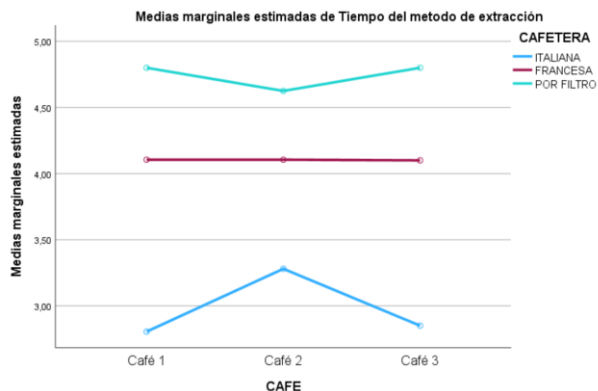


Fig 3. Medias marginales estimadas de tiempo del medio de extracción

E. Análisis del Supuesto del Modelo

Son las condiciones que deben cumplirse para que un modelo estadístico, como el ANOVA, sea válido y sus inferencias sean confiables. Estos supuestos garantizan que los resultados obtenidos sean interpretables y representen correctamente la realidad del fenómeno estudiado.

1) Prueba de Normalidad

H0: Los datos presentan normalidad de residuos

H1: Los datos no presentan la normalidad de residuos

$\alpha = 0.05$.

Dado que se tiene una muestra de 18 datos, la prueba de Shapiro-Wilk es más precisa, y su resultado $p_valor = 0.998 > 0.05$, refuerza la conclusión de que los datos siguen una distribución normal, ver Tabla 6.

Tabla 6: Prueba de Shapiro-Wilk

	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Residuo para TIEMPO EXTR	,102	18	,200 ^a	,989	18	,998

2) Prueba de Homogeneidad de varianza

H0: Las varianzas de los grupos son iguales

H1: Al menos una de las varianzas es diferente

$\alpha = 0.05$.

Para evaluar la homogeneidad de varianzas, se analiza el gráfico pronosticado vs. residuos estandarizados, ver Fig. 4.

Si los residuos tienen una dispersión uniforme a lo largo de los valores pronosticados, se cumple el supuesto de varianzas

homogéneas. En la Fig. 4, fila 3 y columna 2, muestra los puntos están dispersos sin un patrón evidente de ensanchamiento o reducción. No se observa un efecto en abanico, donde los residuos aumentan o disminuyen en amplitud a medida que crecen los valores pronosticados, lo que sugiere que las varianzas son homogéneas.

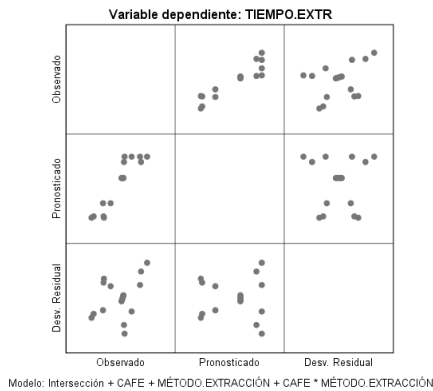


Fig 4. Gráfico de matriz de dispersión

Por lo tanto, dado que se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas, se confirma la validez del ANOVA, permitiendo interpretar sus resultados sin necesidad de aplicar correcciones para varianzas desiguales, como el ANOVA de Welch.

3) Prueba de Independencia de residuos

H0: Los residuos son independientes.

H1: Los residuos no son independientes.

$\alpha = 0.05$

En la Fig 4, en el gráfico Observado vs. Residuos Estandarizados (Fila 3, Columna 1), se evalúa la independencia de los residuos. Si los residuos se distribuyen aleatoriamente alrededor de cero y no muestran patrones, se cumple el supuesto de independencia. En la figura, muestra que los puntos parecen dispersos sin formar estructuras definidas, lo que indica que no hay correlación en los residuos, y el supuesto de independencia se cumple.

En el caso, si hubiera un patrón en forma de onda o curva, indicaría que los residuos están correlacionados y que el modelo no representa bien los datos.

Por lo tanto, dado que las pruebas de normalidad, homocedasticidad e independencia de residuos han sido validadas en este estudio, se puede concluir que los supuestos fundamentales del ANOVA se cumplen, lo que garantiza la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos.

VI. CONCLUSIONES

- 1) El método de extracción influye significativamente en el tiempo de preparación del café, con la cafetera italiana mostrando los tiempos más cortos y la cafetera por filtro los más largos.
- 2) La cafetera francesa muestra tiempos de extracción más consistentes entre los diferentes tipos de café, lo que podría indicar una menor sensibilidad a las características del grano.
- 3) La interacción entre tipo de café y método de extracción sugiere que algunos cafés pueden afectar más el tiempo de preparación dependiendo de la cafetera utilizada, lo que podría

estar relacionado con características como el grado de molienda, la solubilidad o la densidad del grano.

4) Las medias marginales estimadas confirmaron que el método de extracción tiene un mayor impacto en el tiempo de extracción que la marca de café.

5) Los resultados de este estudio pueden ser utilizados para optimizar procesos de extracción en la industria del café, permitiendo elegir métodos más eficientes en función del tiempo.

6) Estos hallazgos pueden ser aplicados tanto en el ámbito comercial como en la investigación de métodos de preparación óptimos.

7) El cumplimiento de los supuestos del modelo estadístico respalda la validez de los resultados obtenidos, asegurando que las diferencias observadas en los tiempos de extracción son efectos reales y no el resultado de sesgos metodológicos.

VII. RECOMENDACIONES

- 1) Utilizar la cafetera italiana si se busca reducir el tiempo de extracción, ya que ha demostrado ser el método más eficiente.
- 2) Controlar la molienda del café, asegurando una molienda uniforme para minimizar la variabilidad en los tiempos de extracción.
- 3) Evaluar el impacto sensorial, para determinar si las diferencias en los tiempos de extracción afectan el sabor, aroma y cuerpo del café.
- 4) Estandarizar las condiciones del experimento, para futuras investigaciones, mantener condiciones controladas de temperatura, presión y cantidad de café y agua para reducir variaciones en los resultados.

VIII. PERSPECTIVAS FUTURAS

Este estudio abre nuevas oportunidades para continuar investigando la relación entre los métodos de extracción de café y sus efectos en la calidad del producto final. En trabajos futuros, se podría ampliar el diseño experimental incluyendo una mayor variedad de métodos de preparación, tipos de café según su origen, nivel de tueste o tipo de molienda, así como condiciones operativas como la temperatura del agua o el tiempo de reposo. Esto permitiría obtener una visión más completa y comparativa del proceso de extracción.

También sería valioso incluir evaluaciones sensoriales realizadas por personas con experiencia en el análisis sensorial del café, con el objetivo de describir de forma objetiva atributos como el aroma, el sabor, el cuerpo y la textura de la bebida. Además, se recomienda incorporar análisis químicos y físico-químicos del café extraído —como la medición de acidez, sólidos disueltos totales, compuestos aromáticos o contenido de cafeína— para establecer relaciones más sólidas entre las condiciones de extracción y las propiedades fisicoquímicas del producto.

Desde el enfoque educativo, futuras investigaciones podrían explorar cómo este tipo de actividades experimentales contribuyen al desarrollo de habilidades clave en estudiantes de ingeniería, como el pensamiento crítico, la toma de decisiones basada en evidencia y el diseño de experimentos. Además, el

enfoque puede extenderse a proyectos interdisciplinarios que vinculen la ingeniería con áreas como la gastronomía, la química de alimentos y la innovación en procesos.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento al equipo de trabajo cuyo compromiso y experiencia han sido fundamentales para la realización de este estudio.

REFERENCES

- [1] Ahmed, S., Brinkley, S., Smith, E., Sela, A., Theisen, M., Thibodeau, C., Cash, S. B. "Climate change and coffee quality: systematic review on the effects of environmental and management variation on secondary metabolites and sensory attributes of *coffea arabica* and *coffea canephora*". *Frontiers in Plant Science*, 12. 2021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.708013>.
- [2] Santos, W., Medeiros, A., Donato, M., Silva, G., Silva, S., "A influência dos métodos de extração nas características físico-químicas das bebidas de café: uma revisão". *Inovação, Gestão E Sustentabilidade Na Agroindústria*. 2021. <https://doi.org/10.31692/iiciagro.0022>.
- [3] Hendon, C. H., Colonna-Dashwood, L., & Colonna-Dashwood, M. "The role of dissolved cations in coffee extraction". *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(21), 4947-4950. 2024. <https://doi.org/10.1021/jf501687c>.
- [4] Rao, N. Z., Fuller, M., Grim, M." Physiochemical characteristics of hot and cold brew coffee chemistry: the effects of roast level and brewing temperature on compound extraction". *Foods*, 9(7), 902. 2024. <https://doi.org/10.3390/foods9070902>.
- [5] Gloess, A., Schönbächler, B., Klopprogge, B., D'Ambrosio, L., Escher, F., Yeretian, C. "Comparison of nine common coffee extraction methods: instrumental and sensory analysis". *European Food Research and Technology*, 236(4), 607-627. 2013. <https://doi.org/10.1007/s00217-013-1917-x>
- [6] Pannusch, V., Schmieder, B., Vannieuwenhuyse, L., Minceva, M., Briesen, H. "Model-based kinetic espresso brewing control chart for representative taste components". *Journal of Food Engineering*, 367, 111887. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111887>.
- [7] Córdoba, N., Pataquiva, L., Osorio, C., Moreno, F., & Ruiz, Y. "Effect of grinding, extraction time and type of coffee on the physicochemical and flavour characteristics of cold brew coffee". *Scientific Reports*, 9(1). 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44886-w>.
- [8] Stanek, N., Zarębska, M., Biłos, L., Barabosz, K., Nowakowska-Bogdan, E., Семенюк, I., ... & Szkutnik, K. "Influence of coffee brewing methods on the chromatographic and spectroscopic profiles, antioxidant and sensory properties". *Scientific Reports*, 11(1). 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01001-2>.
- [9] Angeloni, G., Guerrini, L., Masella, P., Bellumori, M., Daluiso, S., Parenti, A., & Innocenti, M. "What kind of coffee do you drink? An investigation on effects of eight different extraction methods. *Food Research International*, 116, 1327-1335. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.022>.
- [10] Severini, C., Ricci, I., Marone, M., Derossi, A., Pilli, T. D." Changes in the aromatic profile of espresso coffee as a function of the grinding grade and extraction time: a study by the electronic nose system". *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(8), 2321-2327. 2015. <https://doi.org/10.1021/jf505691u>
- [11] Derossi, A., Ricci, I., Caporizzi, R., Fiore, A., Severini, C. How grinding level and brewing method (espresso, american, turkish) could affect the antioxidant activity and bioactive compounds in a coffee cup. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(8), 3198-3207.2018. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8826>.
- [12] Pawliszyn, J. "Theory of extraction. In B. Folmer". *The craft and science of coffee* (pp. 1-24). Academic Press. 2010. <https://doi.org/10.1002/9780813823621.ch1>.
- [13] von Blittersdorff, M., Klatt, C. "The Grind—Particles and Particularities. In B. Folmer". *The Craft and Science of Coffee* (pp. 311-328). 2017. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803520-7.00013-X>.
- [14] Walston, J., Short, D., Badar, M. "An experimental design on coffee extraction factors impacting the measurable percent of total dissolved solids in solution". *Asia-Pacific Journal of Management Research and Innovation*, 18(3-4), 120-130. 2022. <https://doi.org/10.1177/2319510X221136690>.
- [15] Sagredo, M. "Recuperación de compuestos con propiedades antioxidantes a partir de residuos de la industria del café". Trabajo de fin de máster, Universidad de Valladolid. 2022. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/43309>.
- [16] Rentería, A., Jiménez, L., Romero S., & Sancho, D. "Influencia de las variables de proceso en los parámetros de grasa y actividad de agua en diferentes tipos de café de la Amazonia ecuatoriana". *Ciencia Aplicada en Procesos Educativos*, 4(5). 2024. [https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4\(5\)411](https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4(5)411).
- [17] Chapko, M. J., & Seo, H.-S. (2019). Characterizing product temperature-dependent sensory perception of brewed coffee beverages: Descriptive sensory analysis. *Food Research International*, 121, 612-621. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.12.026>.
- [18] Carvalho, G., Schiassi, M., Oliveira, É. Borges, S., Menezes, E., Bueno, T., Queiroz, F. Optimization and Study of the Enzymatic Aqueous Extraction of Coffee Beans and Its Residual Cake. *Journal of Culinary Science & Technology*, 1–22. 2024. <https://doi.org/10.1080/15428052.2024.2414062>.
- [19] Montgomery, Douglas C. Design and analysis of experiments. New York: Wiley, ISBN: 978-1-119-49244-3. 2019.
- [20] Goos, P., Bradley, Jones. Optimal Design of Experiments: A Case Study Approach Primera edition. 2011.
- [21] Puelles Bulnes ME. Implementación experimental del contenido en la asignatura de Diseño de Experimentos para la formación del Ingeniero Industrial. Proceedings of the 21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology; 2023. Available from: https://laccei.org/LACCEI2023-BuenosAires/papers/Contribution_1418_a.pdf
- [22] Puelles Bulnes ME, Trejo Osorio LY, Bautista Rotondo Cortéz G, Jimenez Rojas JF, Valderrama de la Cruz MF. Bifactorial experiment design on the physical performance of a group of students of the Ricardo Palma University, Perú. Proceedings of the 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology; 2024. Available from: https://laccei.org/LACCEI2024-CostaRica/papers/Contribution_1997_final_a.pdf.