

Optimización de trufas con cúrcuma, canela y jengibre mediante diseño de mezclas

Optimization of truffles with turmeric, cinnamon, and ginger using mixture design

Francisco Javier Chapol Flores ^a, Jesús Guadalupe Pérez Flores ^b, Laura García Curiel ^c,
Emmanuel Pérez Escalante ^d, Israel Oswaldo Ocampo Salinas ^e,
Gabriela Sánchez Olguín ^f, Alexis Ayala Niño ^g

Abstract:

The growing demand for healthier sweets drives the incorporation of bioactive spices into chocolate without reducing consumer acceptance. This study optimized chocolate truffles with turmeric, cinnamon, and ginger using a simplex-lattice mixture design fitted to a special cubic model. Formulations were sensory-evaluated, and data were analyzed by ordinary least squares (OLS) with validation through ANOVA, R², RMSE, and residual analysis. Numerical optimization using the Nelder-Mead method indicated good model fit: turmeric-ginger interaction was positive, cinnamon-ginger negative, with cinnamon showing the highest acceptance. The practical optimum was turmeric ≈0.22, cinnamon ≈0.58, and ginger ≈0.20, achieving a balanced flavor profile combining sweetness, earthy notes, and mild spiciness.

Keywords:

Sweetness, pungency, aroma, preference, sensory.

Resumen:

La demanda de dulces más saludables impulsa la incorporación de especias bioactivas al chocolate sin afectar su aceptación. Este estudio optimizó trufas con cúrcuma, canela y jengibre mediante un diseño de mezcla simplex-lattice con modelo cúbico especial. Las formulaciones se evaluaron sensorialmente y los datos se ajustaron por mínimos cuadrados ordinarios (OLS), verificando el modelo con ANOVA, R², RMSE y residuos. Se aplicó optimización numérica con el método de Nelder-Mead. El modelo mostró buen ajuste: la interacción cúrcuma-jengibre fue positiva y canela-jengibre negativa, siendo la canela la de mayor aceptación. El óptimo práctico correspondió a cúrcuma ≈0,22, canela ≈0,58 y jengibre ≈0,20, equilibrando dulzor, notas terrosas y picor.

Palabras Clave:

Dulzor, pungencia, aroma, preferencia, sensorial.

a, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0009-0001-6370-940X>, Email: franciscojavierchapolflores@gmail.com

b, Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-9654-3469>, Email: jesus_perez@uaeh.edu.mx

c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0001-8961-2852>, Email: laura.garcia@uaeh.edu.mx

d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-4268-9753>, Email: emmanuel_perez@uaeh.edu.mx

e Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-5507-4889>, Email: iocampo@uaeh.edu.mx

f Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-8854-4971>, Email: gabrielasanchez@uaeh.edu.mx

g Universidad Autónoma del Estado de México, <https://orcid.org/0000-0002-9232-1906>, Email: aayalan@uaemex.mx

Introducción

La demanda de opciones más saludables ha impulsado el desarrollo de chocolates con ingredientes funcionales que aportan beneficios adicionales a la salud y, al mismo tiempo, mantienen atributos sensoriales atractivos [1–3]. La literatura reciente señala una preferencia del consumidor por productos con menor contenido de azúcar y grasa, y por formulaciones enriquecidas con compuestos con potencial antioxidante u otras propiedades bioactivas, tendencia que se refleja en segmentos premium del mercado [1,4,5].

El chocolate ofrece una matriz propicia para ser utilizada como vehículo de ingredientes funcionales por su composición y complejidad aromática derivada de procesos como fermentación y tostado; las pirazinas de la reacción de Maillard contribuyen a notas tostadas, mientras otros volátiles generan perfiles frutales o florales [6]. La fracción lipídica define fusión y sensación en boca, variables estrechamente relacionadas con la aceptación; intervenciones tecnológicas pueden preservar estas cualidades aun con la adición de funcionales, como se ha observado con probióticos sin cambios relevantes en la composición química ni en la calidad percibida [7,8].

Entre los funcionales de interés destacan la cúrcuma, la canela y el jengibre. Los curcumoides muestran actividad antioxidante y antiinflamatoria con efectos reportados en modulación de citocinas y protección neurológica [9]. En canela, el cinamaldehído aporta perfil aromático compatible con el chocolate y actividades bioactivas descritas en la literatura [10]. El jengibre concentra gingeroles y shogaoles asociados con bienestar digestivo y actividad antiinflamatoria, además de capacidad antioxidante útil en formulaciones con valor añadido [11–13]. La incorporación de especias puede, además, reforzar atributos sensoriales y aumentar la intención de compra del consumidor [14,15].

Para desarrollar formulaciones con múltiples componentes y restricciones tecnológicas, el diseño de mezclas de malla simple permite explorar con eficiencia el espacio compositinal y las interacciones entre factores, reduciendo ensayos respecto a aproximaciones empíricas y ofreciendo una lectura integral de su impacto en calidad final [16–20]. Este enfoque se ha aplicado en diferentes matrices, incluidas confiterías, mostrando utilidad en ajustes de azúcares y en la alineación con preferencias sensoriales y metas de estabilidad [20,21].

El soporte analítico de estos desarrollos integra evaluación sensorial, por ejemplo, escala hedónica y análisis descriptivo, junto con métricas fisicoquímicas y

reológicas para control de proceso y desempeño, complementadas con técnicas espectroscópicas rápidas como NIRS para caracterizar composición [22–25]. El ecosistema de R ofrece paquetes para diseño de mezclas y metodología de superficie de respuesta que facilitan la planificación, el análisis y la optimización en ciencia de los alimentos [26].

La evidencia sugiere que combinar chocolate oscuro con ingredientes herbales puede potenciar efectos funcionales y mejorar la aceptación sensorial, lo que vuelve pertinentes estrategias que integren cúrcuma, canela y jengibre en formatos como trufas [14,27,28].

De acuerdo con todo lo anterior, el objetivo de este estudio fue desarrollar una formulación optimizada de trufas con cúrcuma, canela y jengibre mediante un diseño de mezclas de malla simple, utilizando cúrcuma, canela y jengibre como ingredientes funcionales o factores. El diseño experimental se implementará en R para evaluar el efecto de las proporciones de estos ingredientes en la aceptabilidad sensorial y las propiedades organolépticas del producto, con el fin de establecer una combinación óptima que maximice su calidad y preferencia del consumidor.

Materiales y métodos

Materiales

Todos los ingredientes y aditivos alimentarios utilizados en esta investigación fueron suministrados por una empresa de confitería ubicada en Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, la cual pidió anonimato con la finalidad de proteger sus prácticas comerciales.

Elaboración de las trufas

La elaboración de las trufas con cúrcuma, canela y jengibre se llevó a cabo siguiendo un procedimiento estandarizado para garantizar la reproducibilidad de los resultados. En primer lugar, se pesaron los ingredientes de acuerdo con las cantidades especificadas en la Tabla 1. La cúrcuma (x_1), la canela (x_2) y el jengibre (x_3) fueron pesadas en proporciones definidas por el diseño experimental (Tabla 2), sumando hasta 15 g de la formulación total, obteniendo así un total de 10 formulaciones distintas.

Posteriormente, los ingredientes fueron colocados en un tazón de acero inoxidable y sometidos a un proceso de fusión mediante baño María. La mezcla se calentó a una temperatura controlada de 45–50 °C, removiendo constantemente con una espátula de silicona mediante movimientos envolventes hasta lograr una integración homogénea. Una vez obtenida una textura suave y uniforme, se incorporaron las especias en las proporciones establecidas y se continuó con la mezcla

durante 15 minutos para asegurar una distribución homogénea de los ingredientes.

La pasta resultante fue vertida en una charola previamente cubierta con papel encerado, asegurando una distribución uniforme. Se dejó enfriar a temperatura ambiente (22-25 °C) durante 30 minutos y posteriormente se introdujo en un refrigerador a 8 °C durante 1 hora para obtener una consistencia adecuada para su manipulación, similar a la consistencia de una plastilina.

Transcurrido el tiempo de refrigeración, la pasta fue retirada y boleada manualmente en porciones de aproximadamente 9 g. Para evitar que la mezcla se adhiriera a las manos, se utilizaron guantes de nitrilo y se espolvoreó ligeramente cacao en polvo en la superficie de trabajo.

Finalmente, las trufas con cúrcuma, canela y jengibre fueron recubiertas con cacao en polvo tamizado, asegurando una cobertura uniforme. Una vez formadas, se colocaron en domos de unicel y se almacenaron en refrigeración a 8 °C hasta su evaluación sensorial.

Tabla 1. Ingredientes para la elaboración de las trufas con cúrcuma, canela y jengibre.

Ingredientes	Contenido (g)
Chocolate semiamargo (70% de cacao)	190
Crema para montar	18
Mantequilla	13
Glucosa 42 DE	9
Cúrcuma	x1
Canela	x2
Jengibre	x3

Diseño experimental

Se implementó un diseño de malla simple (simplex lattice) con tres factores correspondientes a los ingredientes funcionales: cúrcuma (x1), canela (x2) y jengibre (x3). Se establecieron tres niveles para cada factor, excluyendo el nivel 0, lo que permitió evaluar combinaciones representativas en la formulación de las trufas con cúrcuma, canela y jengibre.

La codificación de los factores se realizó en función de sus proporciones dentro de la mezcla, asignando un intervalo de hasta 15 g en peso para cada ingrediente. Los valores obtenidos en la matriz experimental se transformaron en las respectivas cantidades de cúrcuma, canela y jengibre, asegurando que la suma de los ingredientes dentro del diseño fuese del 100 %.

Para evitar sesgos en la secuencia de experimentos, se estableció una semilla aleatoria ('set.seed(890)') y se aplicó la función 'sample_frac()' de la librería 'dplyr', lo que permitió obtener un orden aleatorizado de los ensayos dentro del diseño.

Con el objetivo de visualizar la distribución de los experimentos, se generó un diagrama ternario utilizando la función 'TernaryPlot()'. En este gráfico, se representaron los puntos experimentales correspondientes a cada combinación de los factores y se añadieron etiquetas numéricas para identificar cada formulación dentro del diseño (Figura 1). Finalmente, la matriz experimental se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Matriz experimental del diseño de malla simple para la formulación de trufas con cúrcuma, canela y jengibre.

x1	x2	x3	Cúrcuma (g)	Canela (g)	Jengibre (g)
1.00	0.00	0.00	15	0	0
0.00	0.33	0.67	0	5	10
0.33	0.67	0.00	5	10	0
0.67	0.33	0.00	10	5	0
0.00	0.67	0.33	0	10	5
0.00	1.00	0.00	0	15	0
0.33	0.00	0.67	5	0	10
0.00	0.00	1.00	0	0	15
0.33	0.33	0.33	5	5	5
0.67	0.00	0.33	10	0	5

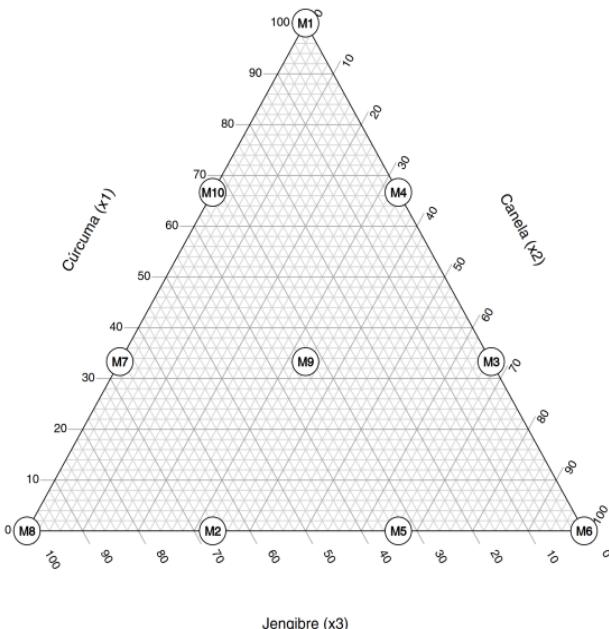


Figura 1. Distribución de los experimentos en el diagrama ternario del diseño de mezclas para trufas con cúrcuma, canela y jengibre

Análisis sensorial

La evaluación sensorial fue realizada por 20 panelistas entrenados, todos ellos estudiantes de la Licenciatura en Química de Alimentos de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. Los panelistas fueron capacitados para evaluar el nivel de aceptabilidad

general. Las muestras se presentaron individualmente a los evaluadores en recipientes pequeños de plástico, etiquetados con códigos de tres dígitos. Los panelistas asignaron puntuaciones de 1 a 5 para la aceptabilidad general del producto: 1 = no me gusta, 2 = ni me gusta ni me disgusta, 3 = me gusta ligeramente, 4 = me gusta moderadamente y 5 = me gusta mucho [2].

Optimización

La optimización de la mezcla se realizó a partir del modelo cúbico especial ajustado para tres componentes (x_1 = cúrcuma, x_2 = canela y x_3 = jengibre). Las proporciones de los ingredientes fueron restringidas de modo que se cumpliera la condición de mezcla que se muestra en la Ecuación 1.

$$\begin{aligned}x_1 + x_2 + x_3 &= 1 \\x_i &\geq 0\end{aligned}\quad \text{Ec. 1}$$

Donde x_i representó la fracción en base seca de cada ingrediente en la formulación.

El modelo cúbico especial se ajustó para describir la respuesta sensorial (Y), comúnmente representada en diseños de mezclas como se muestra en la Ecuación 2 [29].

$$Y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3 \quad \text{Ec. 2}$$

Donde β_1, β_2 y β_3 correspondieron a los efectos lineales individuales de cada componente, β_{ij} a las interacciones binarias y β_{123} a la interacción ternaria. La estimación de los coeficientes se obtuvo mediante regresión por mínimos cuadrados ordinarios.

Posteriormente, se evaluó la calidad del ajuste a través del coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente ajustado (R^2_{adj}) y el error cuadrático medio de la raíz (RMSE), calculado como se presenta en la Ecuación 3 [30].

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (Y_k^{\text{obs}} - Y_k^{\text{pred}})^2} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde Y_k^{obs} y Y_k^{pred} representaron los valores observados y predichos, respectivamente.

Una vez validado el modelo, la optimización de la mezcla se realizó maximizando la respuesta sensorial predicha. Para garantizar que las proporciones se mantuvieran dentro del espacio factible de la mezcla, se empleó una parametrización de razón logarítmica (log-ratio), expresada como se muestra en la Ecuación 4.

$$\begin{aligned}x_1 &= (1 + e_{p1} + e_{p2})/e_{p1}, x_2 = (1 + e_{p1} + e_{p2})/e_{p2}, x_3 \\&= (1 + e_{p1} + e_{p2})/1\end{aligned}$$

Ec. 4

Esta parametrización permitió transformar el problema de optimización con restricciones en un problema irrestricto en el plano (p_1, p_2).

La función objetivo empleada fue como se muestra en la Ecuación 5.

$$\text{Maximizar } Y_{\text{pred}}(x_1, x_2, x_3)$$

Ec. 5

La solución numérica se obtuvo mediante el método de Nelder–Mead, implementado con el algoritmo ‘optim()’ en R, utilizando como punto inicial la mejor combinación encontrada en una malla sistemática generada en el simplex (espacio experimental) de la mezcla.

Finalmente, la formulación óptima se expresó como el conjunto de proporciones (x_1^*, x_2^*, x_3^*) que mostraron el mayor valor predicho de aceptabilidad sensorial (Y_{pred}^*). Estos valores fueron exportados y documentados en el archivo de resultados para su validación experimental.

Entorno de cómputo

El diseño de mezclas, el ajuste del modelo cúbico especial y la optimización de la formulación se realizaron en el lenguaje de programación R (versión 4.3.3, “Angel Food Cake”). Se utilizaron principalmente los paquetes ‘mixexp’ para la generación y ajuste del diseño de mezclas y la elaboración de gráficos de contorno, ‘dplyr’ para el manejo de datos y ‘Ternary’ para la construcción de diagramas ternarios. La búsqueda numérica del óptimo se implementó con la función ‘optim()’ empleando el método Nelder–Mead aplicado a la parametrización mediante razones logarítmicas de la mezcla.

Resultados y discusión

Ajuste y validez del modelo

Los parámetros de ajuste del modelo indicaron que $R^2 = 0.99996$ y R^2 ajustado = 0.99987, lo que mostró que el 99.996 % de la variabilidad de la aceptabilidad fue explicada por las proporciones de cúrcuma, canela y jengibre; el RMSE ≈ 0.65 confirmó desviaciones promedio pequeñas entre valores observados y predichos en el dominio evaluado, en consonancia con la literatura que reporta capacidad predictiva moderada y limitada por el tamaño del diseño de modelos de mezclas y RSM en formulación de alimentos y sistemas con compuestos

funcionales [31–34]. Estos indicadores, tomados en conjunto, sustentaron un desempeño estable del modelo para fines de predicción y optimización dentro del *simplex* (espacio experimental).

El patrón inferencial mostrado en la Tabla 3 fue congruente con esa lectura: se observaron efectos principales con magnitudes F elevadas y p muy bajas para cúrcuma (x_1 : $F = 39089.5$, $p = 2.85 \times 10^{-7}$), canela (x_2 : $F = 23573.6$, $p = 6.09 \times 10^{-7}$) y jengibre (x_3 : $F = 14780.0$, $p = 1.23 \times 10^{-6}$), acompañadas de coeficientes estimados positivos (100.48, 110.48 y 102.05, respectivamente), lo que confirmó su contribución directa y relevante a la aceptabilidad. La interacción $x_1 \cdot x_3$ mostró un efecto positivo significativo ($F = 71.07$, $p = 0.0035$; estimación = +32.57), mientras que $x_2 \cdot x_3$ resultó negativa y significativa ($F = 57.34$, $p = 0.0048$; estimación = -39.43); en contraste, $x_1 \cdot x_2$ y el término ternario no mostraron evidencia estadística ($p = 0.944$ y $p = 0.327$), con coeficientes de baja magnitud. El error estándar residual ≈ 1.18 ($gl = 3$) fue coherente con estas métricas de desempeño y con la precisión documentada en modelos que capturan interacciones de compuestos aromáticos en matrices alimentarias, reforzando la validez del ajuste más allá de la varianza explicada y ofreciendo base suficiente para la optimización posterior [33–35].

La lectura integrada de la Tabla 3 se alineó con la evidencia sensorial disponible: la contribución directa de cúrcuma, canela y jengibre a la aceptabilidad coincidió con sus perfiles aromáticos y trigeminales, donde el aroma dulce-especiado de la canela, las notas terrosas de la cúrcuma y la pungencia del jengibre configuran el marco perceptual reportado para matrices alimentarias con especias [36–38]. La interacción positiva $x_1 \cdot x_3$ puede interpretarse como un equilibrio entre la pungencia del jengibre y las notas terrosas de la cúrcuma, relación descrita cuando variaciones de compuestos tipo gingeroles/shogaoles modulan el agrado siempre que se compensen con componentes aromáticos de fondo [39,40]. Por otro lado, la interacción negativa $x_2 \cdot x_3$ es coherente con escenarios en los que un aumento de pungencia atenúa la percepción de dulzor y aroma de la canela, reduciendo la redondez del perfil sensorial en productos con sabores complejos [37,41].

Este patrón de efectos e interacciones resulta consistente con estudios que describen cómo la combinación de especias genera sinergias o antagonismos en función de la dosis y del contexto de la matriz, y cómo enfoques de optimización basados en diseños de mezclas capturan estas relaciones para orientar formulaciones con mayor aceptación [42,43]. Los coeficientes y pruebas de significancia de la Tabla 3 sugieren que el balance entre pungencia, intensidad aromática y dulzor especiado explica la dirección y magnitud de los efectos estimados

y que el modelo refleja relaciones sensoriales plausibles en el rango de proporciones evaluado [39–41].

En términos químicos, los efectos lineales y binarios estimados son coherentes con los compuestos mayoritarios de cada especia, donde curcumina, cinamaldehído y el par gingerol–shogaol moldean el balance entre pungencia, notas cálidas y dulzor aromático en matrices de chocolate [44–46]. Dada la variabilidad interindividual en la sensibilidad a estos estímulos, las estimaciones cuantitativas del modelo ofrecen una base objetiva para ajustar las proporciones de cúrcuma, canela y jengibre hacia regiones del espacio de mezcla asociadas con mayor preferencia sensorial [47–49].

Tabla 3. Parámetros inferenciales y coeficientes estimados del modelo cúbico especial para la aceptabilidad, incluyendo efectos principales, interacciones y su interpretación sensorial

Término	Coeficiente	Valor de p	Interpretación integrada
x_1	100.48	2.85×10^{-7}	Efecto principal relevante; contribución moderada de la cúrcuma al sabor.
x_2	110.48	6.09×10^{-7}	Efecto principal relevante; mayor aporte positivo de la canela al perfil aromático dulce.
x_3	102.05	1.23×10^{-6}	Efecto principal relevante; el jengibre aporta pungencia e incrementa la intensidad aromática del sistema.
$x_1 \cdot x_2$	-2.14	0.94	Sin interacción notable; la combinación cúrcuma–canela no muestra efecto destacado.
$x_1 \cdot x_3$	32.57	0.0035	Interacción positiva; la mezcla cúrcuma–jengibre resalta notas

Término	Coeficiente	Valor de p	Interpretación integrada
$x_2 \cdot x_3$	-39.43	0.0048	especiales equilibradas. Interacción negativa; la pungencia del jengibre desplaza el dulzor aromático de la canela.
$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$	45.00	0.33	Interacción ternaria no dominante dentro del rango experimental evaluado.

La idoneidad del ajuste se corroboró con la batería diagnóstica mostrada en la Figura 2, de acuerdo con las recomendaciones para evaluar modelos en datos de diseños de mezcla en ciencia de alimentos [50,51]. En el gráfico “Residuals vs Fitted” los errores se distribuyeron alrededor de cero sin estructura aparente, compatible con homocedasticidad y ausencia de relaciones sistemáticas no modeladas [50,52]. El gráfico “Q–Q Residuals” mostró una alineación casi lineal, con desviaciones leves en el extremo superior, indicativas de normalidad aproximada; estudios recientes que refinan esta lectura mediante niveles locales iguales en Q–Q respaldan que desviaciones pequeñas no comprometen la validez del modelo [51,53]. La gráfica “Scale–Location” evidenció varianza residual prácticamente constante a lo largo de los valores ajustados, sin indicios claros de heterocedasticidad estructurada [50]. Finalmente, las distancias de Cook situaron a las observaciones con mayor influencia relativa por debajo de umbrales preocupantes, lo que sugiere ausencia de puntos con impacto desproporcionado en la estimación [51].

De forma complementaria, la comparación entre valores observados y predichos (Figura 3) mostró que los puntos se ubicaron muy próximos a la línea de identidad ($y = x$), lo que confirmó la concordancia entre valores experimentales y estimaciones del modelo dentro de la región experimental evaluada. La combinación de métricas globales de ajuste, resultados inferenciales (Tabla 3) y diagnóstico gráfico respalda que el modelo cúbico especial describe adecuadamente la relación entre las proporciones de cúrcuma, canela y jengibre y el nivel de aceptabilidad general, y ofrece una base estadísticamente sólida para la etapa de optimización en el dominio de mezcla considerado.

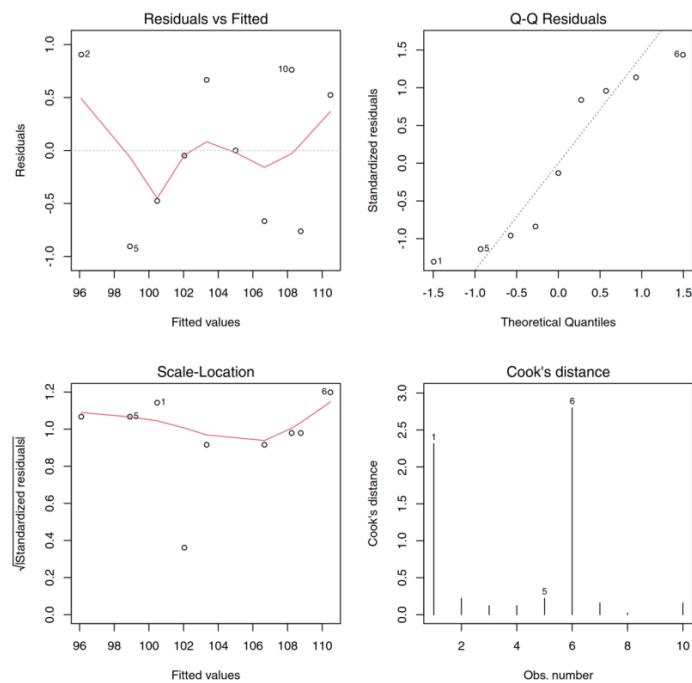


Figura 2. Gráficos de diagnóstico del modelo

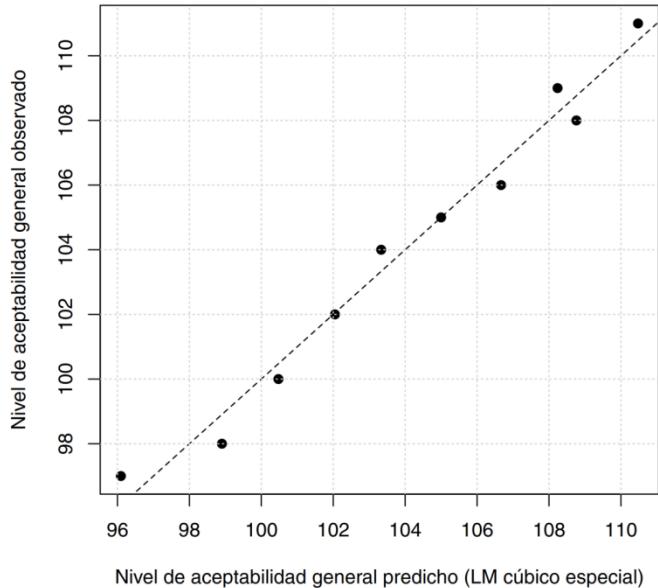


Figura 3. Comparación entre valores observados y predichos.

Contribución de cada ingrediente y sus interacciones

Con base en los efectos principales e interacciones estimados en el modelo cúbico especial (Tabla 3), la Figura 4 muestra cómo cambia el nivel de aceptabilidad general al desplazar cada componente alrededor del centroide. La curva negra (cúrcuma, x_1) presentó un perfil

parabólico con un máximo cercano al centro; la curva roja segmentada (canela, x_2) ascendió con claridad en ambos sentidos; y la curva verde punteada (jengibre, x_3) descendió suavemente al alejarse del punto central. Este patrón respalda que la canela actuó como eje dulce-aromático que elevó de forma sostenida la respuesta, mientras que el jengibre aportó agrado dentro de un intervalo moderado y la cúrcuma rindió mejor en proporciones intermedias, donde sus notas terrosas no dominan el perfil.

La literatura ayuda a explicar estas trayectorias. El jengibre aporta compuestos fenólicos como zingerona y shogaol tras el secado, responsables de un carácter picante-dulce que puede resultar agradable en cantidades moderadas, pero cuya intensificación reduce la aceptabilidad, coherente con la pendiente negativa de la curva verde fuera del entorno central [37,54]. En fresco, sus notas cálidas y ligeramente alcanforadas pueden favorecer el agrado siempre que la intensidad se mantenga contenida [55,56]. La cúrcuma combina curcumina con fracciones aromáticas como turmeronas y eucaliptol, que aportan un perfil terroso y ligeramente dulce; de ahí la cúpula de la curva negra, compatible con un óptimo sensorial en niveles medios y una disminución del agrado cuando emergen matices amargos o astringentes [57]. Por su parte, la curva roja de la canela concuerda con el efecto esperado del cinamaldehído: un aroma dulce-especiado que suele alinear preferencia del consumidor y que, en matrices con cacao, realza la percepción de dulzor [36,58].

El equilibrio entre estas vías sensoriales también explica las interacciones estimadas en el modelo. La combinación cúrcuma-jengibre puede resultar armónica cuando las notas terrosas de la cúrcuma amortiguan la pungencia, mientras que la pareja canela-jengibre se vuelve menos favorable si la pungencia desplaza el dulzor aromático. Este marco es coherente con estudios que demuestran cómo ajustes en dulzor y componentes especiados pueden moderar la pungencia y mejorar la palatabilidad en mezclas de especias, con posibles beneficios tecnológicos y nutricionales adicionales [37,57,59]. Por lo tanto, la lectura del gráfico y la evidencia química-sensorial convergen en una misma conclusión: el nivel de aceptabilidad general depende del balance entre el dulzor aromático de la canela, el carácter terroso de la cúrcuma y la pungencia modulada del jengibre dentro del dominio de mezcla.

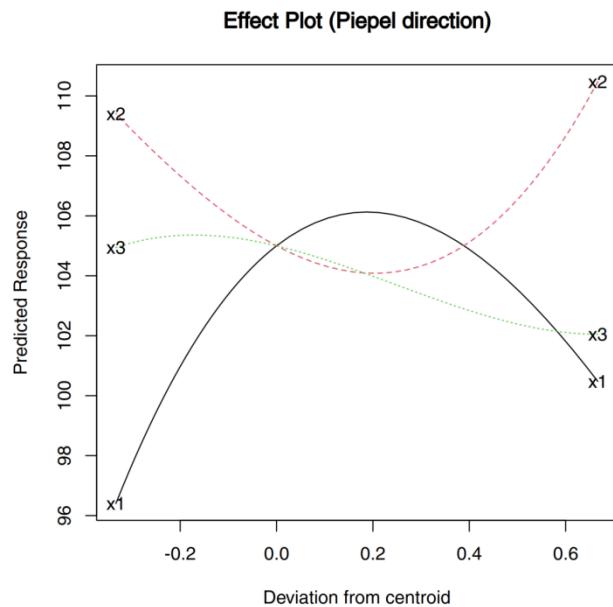


Figura 4. Gráfico de efectos (dirección de Piepel) para la aceptabilidad sensorial

Representación del espacio de mezcla

La Figura 5 muestra la superficie de respuesta en el espacio ternario para la aceptabilidad sensorial. Los tonos claros representan valores más altos de agrado, mientras que los tonos rojizos indican una disminución de la respuesta. La región con mayor nivel de aceptabilidad general se concentró hacia composiciones donde la canela (x_2) se mantuvo relativamente elevada, la cúrcuma (x_1) en niveles intermedios y el jengibre (x_3) en proporciones moderadas o bajas. Este patrón coincide con el efecto principal positivo de la canela observado en el modelo, cuyo carácter dulce-aromático se ha descrito como capaz de suavizar y redondear los perfiles especiados en matrices con cacao, favoreciendo una sensación de mayor agrado y familiaridad gustativa [36].

La zona cercana al vértice de x_3 mostró valores notablemente más bajos de aceptabilidad. Esto sugiere que, al incrementar el jengibre, la pungencia asociada a compuestos como gingerol y shogaol pudo intensificarse hasta desplazar las notas cálidas y dulces de la canela, reduciendo el agrado sensorial. Este comportamiento visual se corresponde con la interacción negativa $x_2 \cdot x_3$ del modelo, donde el aumento conjunto de ambos ingredientes redujo la redondez del perfil aromático. Este efecto ha sido descrito en sistemas culinarios donde el jengibre, al superar cierto umbral, adquiere un carácter dominante que limita la armonía aromática del conjunto [37,44].

Por otra parte, la cúrcuma (x_1) mostró un desempeño más

favorable en niveles intermedios: cuando predominó en la mezcla sin la presencia moderadora de la canela, la aceptabilidad disminuyó, posiblemente debido a la mayor expresión de matices terrosos y amargos asociados a la curcumina. Estudios previos han señalado que la cúrcuma puede integrarse sensorialmente de manera más efectiva cuando se acompaña de notas cálidas o dulces, lo que atenúa su carácter terroso y contribuye a una percepción aromática más equilibrada [57].

La región de alta aceptabilidad fue relativamente estrecha, lo que indica que el sistema responde de forma sensible a pequeñas variaciones en la proporción de jengibre y cúrcuma. Esta sensibilidad concuerda con reportes que señalan que la aceptación de mezclas especiadas depende de un equilibrio fino entre la pungencia y el perfil aromático global, y no únicamente de la presencia de cada ingrediente [48]. Por ello, la selección de formulaciones no puede basarse solo en ajustes sensoriales incrementales, sino en una estrategia de optimización guiada por el modelo.

La Figura 5 confirma que el nivel de aceptabilidad general del sistema está gobernada por el balance relativo entre las especias: la canela funciona como componente estructurante del aroma dulce-cálido, mientras que la cúrcuma y el jengibre contribuyen positivamente solo dentro de intervalos específicos que controlen la aparición de notas terrosas o pungentes en exceso.

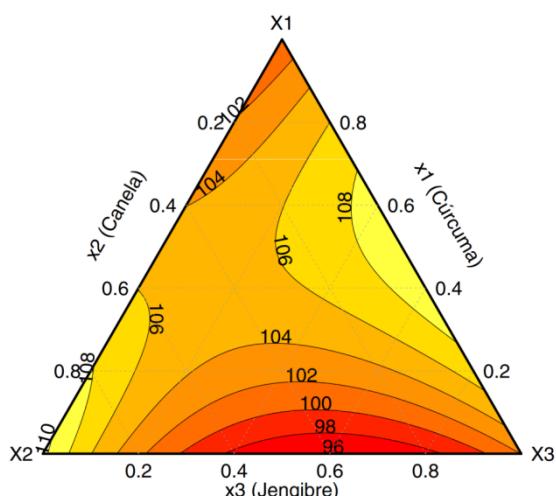


Figura 5. Gráfico de contorno en el espacio de mezcla para el nivel de aceptabilidad general

Determinación de la formulación óptima

La optimización se abordó en dos etapas. En la maximización global sin restricciones, el modelo llevó el óptimo al vértice dominado por la canela con el vector $(x_1, x_2, x_3) = (6.31 \times 10^{-17}, 9.999999999984 \times 10^{-1}, 1.58 \times 10^{-14})$ y un nivel de aceptabilidad general predicho (Y_{pred}) de 110.48. Expresado en una mezcla de 100 g, esto corresponde aproximadamente a: cúrcuma $\approx 6.31 \times 10^{-15}$ g, canela ≈ 100 g y jengibre $\approx 1.58 \times 10^{-12}$ g, es decir, una formulación prácticamente compuesta únicamente por canela. Este resultado coincidió con el desempeño sensorial observado, donde las formulaciones con mayor proporción de canela mostraron los valores de agrado más altos, coherentes con su aporte aromático dulce-especiado en matrices con cacao [36]. Sin embargo, esta solución no cumplió el criterio de formulación definido para este producto, que requiere la presencia perceptible de las tres especias para evitar un perfil sensorial plano o dominado por una sola nota. Por ello, se procedió a la optimización con restricciones, manteniendo rangos sensorialmente razonables para cada componente.

En la segunda etapa se fijaron intervalos sensorialmente razonables para cada componente ($x_1 = 0.15-0.30$; $x_2 = 0.40-0.70$; $x_3 = 0.10-0.25$) y se obtuvo un máximo local con $x_1 \approx 0.22$ (cúrcuma), $x_2 \approx 0.58$ (canela) y $x_3 \approx 0.20$ (jengibre). Esta combinación se situó dentro de una zona continua de alta respuesta, lo que sugiere cierta tolerancia a pequeñas variaciones de proceso. La justificación sensorial es consistente con la literatura previa citada en el manuscrito: la canela actúa como eje dulce-aromático que organiza el perfil [36], la cúrcuma en niveles moderados aporta color y notas terrosas suaves sin intensificarlas [57], y el jengibre, mantenido en un rango controlado, añade un matiz especiado fresco sin escalar la pungencia derivada de gingeroles y shogaoles que reduciría el agrado cuando se incrementa en exceso [37,44]. El balance resultante coincide con la sinergia $x_1 \cdot x_3$ y el antagonismo $x_2 \cdot x_3$ estimados por el modelo, y con evidencias de que la aceptabilidad en mezclas especiadas depende de un ajuste fino entre la intensidad aromática y la pungencia [48].

La proximidad entre los valores observados en formulaciones vecinas a este punto y las predicciones del modelo respaldó la elección de un óptimo restringido sensorialmente interpretable y factible de reproducir en elaboración. Aun así, subsisten limitaciones: no se ejecutaron pruebas confirmatorias del óptimo; el nivel de aceptabilidad general se trató como respuesta global sin desagregar atributos específicos; y no se evaluó el efecto de variables tecnológicas (reposo, templado, almacenamiento) que pueden modular la expresión volátil y la pungencia. Estudios futuros con validación

experimental, perfiles sensoriales detallados y control de proceso permitirán consolidar la aplicabilidad de la formulación propuesta en entornos de producción real.

Conclusiones

La formulación de trufas con cúrcuma, canela y jengibre fue optimizada mediante un diseño de mezclas y un modelo cúbico especial con el objetivo de maximizar la aceptabilidad sensorial manteniendo perceptibles las tres especias. El ajuste del modelo permitió describir con rigor las contribuciones individuales y sus interacciones, observándose un predominio aromático de la canela y un equilibrio sensorial cuando la cúrcuma y el jengibre permanecieron en rangos moderados. La búsqueda irrestricta condujo a una solución no alineada con el criterio sensorial, por lo que se favoreció un óptimo práctico que preservó el balance aromático y la reproducibilidad en elaboración. Con ello, el objetivo de proponer una mezcla viable y orientada al agrado del consumidor quedó cumplido.

Se recomienda validar el óptimo con lotes confirmatorios y un perfil sensorial descriptivo, incorporar análisis de compuestos volátiles, textura instrumental y pruebas de almacenamiento para relacionar estabilidad con percepción, y aplicar una optimización multiobjetivo basada en funciones de deseabilidad que integre, de manera simultánea, aceptabilidad global, intensidad aromática mínima para cada especia y viabilidad tecnológica (p. ej., facilidad de formado y recubrimiento). Esta estrategia reduciría soluciones en vértices y consolidaría un espacio operativo robusto para transferencia a planta piloto.

Referencias

- [1] Li Y, James B. Oral processing preference affects flavor perception in dark chocolate with added ingredients. *J Food Sci* 2021;86:177–83. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15557>
- [2] Muhammad DRA, Zulfa F, Purnomo D, Widiatmoko C, Fibri DLN. Consumer acceptance of chocolate formulated with functional ingredient. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 2021;637:012081. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/637/1/012081>
- [3] Okstavyani E, Lestari PD, Kawiji K, Anandito RBK, Yulviantun A, Sefrienda AR, et al. Antioxidant, physicochemical and rheological properties of white and milk chocolate compounds supplemented with plant-based functional ingredients. *Foods* 2024;13:3694. <https://doi.org/10.3390/foods13223694>
- [4] Del Prete M, Samoggia A. Chocolate consumption and purchasing behaviour review: research issues and insights for future research. *Sustainability* 2020;12:5586. <https://doi.org/10.3390/su12145586>
- [5] Kumari A, Pandey S, Kumar Chauhan A, Singh M. Optimization and characterization of functional chocolate with addition of butter fruit milkshake powder as a source of phenolic, flavonoid and carotenoid. *Indian J Dairy Sci* 2021;74:54–60. <https://doi.org/10.33785/IJDS.2021.v74i01.007>
- [6] Schlüter A, Hühn T, Kneubühl M, Chatelain K, Rohn S, Chetschik I. Comparison of the aroma composition and sensory properties of dark chocolates made with moist incubated and fermented cocoa beans. *J Agric Food Chem* 2022;70:4057–65. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c08238>
- [7] Mirković M, Seratlić S, Kilcawley K, Mannion D, Mirković N, Radulović Z. The sensory quality and volatile profile of dark chocolate enriched with encapsulated probiotic *Lactobacillus plantarum* bacteria. *Sensors* 2018;18:2570. <https://doi.org/10.3390/s18082570>
- [8] Shah AB, Jones GP, Vasiljevic T. Sucrose-free chocolate sweetened with Stevia rebaudiana extract and containing different bulking agents: effects on physicochemical and sensory properties. *Int J Food Sci Technol* 2010;45:1426–35. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02283.x>
- [9] Ballester P, Cerdá B, Arcusa R, García-Muñoz AM, Marhuenda J, Zafrilla P. Antioxidant activity in extracts from Zingiberaceae family: cardamom, turmeric, and ginger. *Molecules* 2023;28:4024. <https://doi.org/10.3390/molecules28104024>
- [10] Ali ME, Alsalam SA, Al-Thubyani SA, Baazaoui N, Ahmed AE, Nasser M-EA, et al. Impact of ginger powder (*Zingiber officinale*) supplementation on performance, biochemical parameters, antioxidant status, and rumen fermentation in Ossimi rams. *Vet World* 2024;17:1619–28. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2024.1619-1628>
- [11] Ibrahim UM, Abdu SB, Musa A, Saleh I. Effect of feeding diets containing levels of ginger (*Zingiber officinale*) on digestibility and nitrogen balance of red Sokoto bucks. *Dutse J Pure Appl Sci* 2023;9:219–25. <https://doi.org/10.4314/dujopas.v9i3a.22>
- [12] Khan F, Nayab M, Ansari AN. Zanjabeel (*Zingiber officinale Roscoe*): an evidence-based review of anti-nociceptive, anti-inflammatory, antioxidant, and antimicrobial properties. *J Complement Altern Med Res* 2021;15:26–35. <https://doi.org/10.9734/jocamr/2021/v15i330269>
- [13] Shareef S. Anti-inflammatory and antioxidant activities of ginger. In: Kaushik P, editor. *Ginger – Cultivation and Use*. IntechOpen; 2023. <https://doi.org/10.5772/intechopen.108611>
- [14] Aroyeun SO, Okunade AF, Obatoye AO, Olalekna MA. Nutritional profile and organoleptic qualities of milk chocolate incorporated with different spices. *Asian Food Sci J* 2020;13:1–8. <https://doi.org/10.9734/afsj/2019/v13i430117>
- [15] Muhammad DRA, Marettama NM, Fauza G, Affandi DR. Can ingredients and information interventions affect hedonic level and (emo-sensory) perceptions of milk chocolate and cocoa drink consumers? *Open Agric* 2022;7:847–56. <https://doi.org/10.1515/opag-2022-0146>
- [16] Borhan FP, Abd Gani SS, Shamsuddin R. The use of D-optimal mixture design in optimising okara soap formulation for stratum corneum application. *Sci World J* 2014;2014:173979. <https://doi.org/10.1155/2014/173979>
- [17] Caniyilmaz E, Uçarkuş B, Karaman S. Optimization of formulation ingredients and aging time for ice cream processing using combined design approach. *J Food Process Preserv* 2016;40:1325–38. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12718>

- [18] Kefale B, Delele MA, Fanta SW, Abate S. Optimization of Awaze paste formulations: effects of spices using mixture design approach. *Heliyon* 2024;10:e35141. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35141>
- [19] Li Y, Zhang Y, Wang M, Jiang L, Sui X. Simplex-centroid mixture design applied to aqueous enzymatic extraction of fatty acid-balanced oil from mixed seeds. *J Am Oil Chem Soc* 2013;90:349–57. <https://doi.org/10.1007/s11746-012-2180-1>
- [20] Malvano F, Laudisio M, Albanese D, d'Amore M, Marra F. Olive oil-based oleogel as fat replacer in sponge cake: comparative study and optimization. *Foods* 2022;11:2643. <https://doi.org/10.3390/foods11172643>
- [21] Spanemberg FEM, Korzenowski AL, Sellitto MA. Effects of sugar composition on shelf life of hard candy: optimization study using D-optimal mixture design. *J Food Process Eng* 2019;42:e13213. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13213>
- [22] Doğan G, Yilmaz İ. Product development and sensory evaluation of dark chocolate filled with chestnut honey. *Black Sea J Agric* 2023;6:452–8. <https://doi.org/10.47115/bsagriculture.1293710>
- [23] Gonçalves EV, Lannes SCDS. Chocolate rheology. *Ciênc Tecnol Aliment* 2010;30:845–51. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612010000400002>
- [24] Gunaratne TM, Gonzalez Viejo C, Gunaratne NM, Torrico DD, Dunshea FR, Fuentes S. Chocolate quality assessment based on chemical fingerprinting using near infra-red and machine learning modeling. *Foods* 2019;8:426. <https://doi.org/10.3390/foods8100426>
- [25] Kongor JE, Owusu M, De Pascual-Teresa S, Álvarez MD, Kyei-Baffour VO, Oduro-Yeboah C, et al. Physicochemical properties, sensory profile and consumer acceptability of beetroot dark chocolate. *J Sci Food Agric* 2024;104:9603–16. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13785>
- [26] Tontul I, Topuz A. Production of pomegranate fruit leather (pestil) using different hydrocolloid mixtures: an optimization study by mixture design. *J Food Process Eng* 2018;41:e12657. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12657>
- [27] Azizah RNP, Anggreini P, Prasetya F. Effect of combination of dark chocolate and herbal ingredients for dysmenorrhea in late adolescents. *J Trop Pharm Chem* 2023;7:1–9. <https://doi.org/10.25026/jtpc.v7i1.503>
- [28] Martini S, Conte A, Tagliazucchi D. Comprehensive evaluation of phenolic profile in dark chocolate and dark chocolate enriched with Sakura green tea leaves or turmeric powder. *Food Res Int* 2018;112:1–16. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.06.020>
- [29] Bhalerao PP, Mahale SA, Dhar R, Chakraborty S. Optimizing the formulation for a pomegranate–amla–muskmelon mixed fruit beverage using sensory analysis and evaluating thermal stability. *LWT* 2020;133:109907. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109907>
- [30] Onu CE, Igbokwe PK, Nwabanne JT, Nwajinka CO, Ohale PE. Evaluation of optimization techniques in predicting optimum moisture content reduction in drying potato slices. *Artif Intell Agric* 2020;4:39–47. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2020.04.001>
- [31] Du H, Lu H, Tu S, Li Y, Zhong K, Kang Y, et al. Predicting minty compounds binary mixtures' pleasantness by odor intensity in aqueous solutions. *J Food Sci* 2023;88:4693–704. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16738>
- [32] Fokas R, Anastopoulou Z, Vantarakis A. Antimicrobial activity of Greek native essential oils against *Escherichia coli* O157:H7 and antibiotic resistance strains harboring pNorm, mecA, mcr-1 and blaOXA genes. *Antibiotics* 2025;14:741. <https://doi.org/10.3390/antibiotics14080741>
- [33] Raza N, Arshad MU, Saeed F, Farooq U, Naz A, Murtaza MS, et al. Comparative study of innovative blends prepared by fortification of date powder to alleviate child malnutrition. *Food Sci Nutr* 2020;8:5875–87. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1862>
- [34] Xu G, Wang X, Jin X, Wu Y, Song S, Zhou M, et al. A novel *Eurycoma longifolia*-loaded flexible nano-liposome gel formulation: preparation, characterization, in vitro and in vivo studies. *ChemistrySelect* 2025;10:e03024. <https://doi.org/10.1002/slct.202503024>
- [35] Tajkarimi MM, Ibrahim SA, Cliver DO. Antimicrobial herb and spice compounds in food. *Food Control* 2010;21:1199–218. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2010.02.003>
- [36] Khalil S, Helmy S, Sasy A. Improvement of physio-chemical, sensory and microbiological characteristics of sweet sorghum. *Alex J Food Sci Technol* 2019;16:35–43. <https://doi.org/10.21608/ajfs.2020.14239.1010>
- [37] Vázquez-Fresno R, Rosana ARR, Sajed T, Onookome-Okome T, Wishart NA, Wishart DS. Herbs and spices biomarkers of intake based on human intervention studies: a systematic review. *Genes Nutr* 2019;14:18. <https://doi.org/10.1186/s12263-019-0636-8>
- [38] Zhi TX, Liu KQ, Cai KY, Zhao YC, Li ZW, Wang X, et al. Anti-lung cancer activities of 1,2,3-triazole curcumin derivatives via regulation of MAPK/NF-κB/STAT3 signaling pathways. *ChemMedChem* 2022;17:e202100676. <https://doi.org/10.1002/cmdc.202100676>
- [39] Sendanayake LR, Sylvester TP, De Silva UHAJ, Dissanayake DRRP, Daundasekera DMKC, Sooriyapathirana SDSS. Consumer preference, antibacterial activity and genetic diversity of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) cultivars grown in Sri Lanka. *J Agric Sci Sri Lanka* 2017;12:207–21. <https://doi.org/10.4038/jas.v12i3.8267>
- [40] Yusop SM, O'Sullivan MG, Kerry JF, Kerry JP. Sensory evaluation of Chinese-style marinated chicken by Chinese and European naïve assessors. *J Sens Stud* 2009;24:512–33. <https://doi.org/10.1111/j.1745-459X.2009.00224.x>
- [41] Paswan VK, Shekhar Singh C, Kukreja G, Shankar Bunkar D, Kumar Bhinchhar B. Health benefits and functional and medicinal properties of some common Indian spices. In: Ahmad RS, editor. *Herbs and Spices – New Processing Technologies*. IntechOpen; 2021. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98676>
- [42] Dwivedi S, Vasavada MN, Cornforth D. Evaluation of antioxidant effects and sensory attributes of Chinese 5-spice ingredients in cooked ground beef. *J Food Sci* 2006;71:S1–5. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.tb12381.x>
- [43] Ivanović M, Makoter K, Islamčević Razboršek M. Comparative study of chemical composition and antioxidant activity of essential oils and crude extracts of four characteristic Zingiberaceae herbs. *Plants* 2021;10:501. <https://doi.org/10.3390/plants10030501>
- [44] Amer SA, Rizk AE. Production and evaluation of novel functional extruded corn snacks fortified with ginger, bay leaves and turmeric powder. *Food Prod Process Nutr* 2022;4:4. <https://doi.org/10.1186/s43014-022-00083-3>
- [45] Saranya B, Sulfiyalni T, Chindhu S, Muneeb AM, Leela NK, Zachariah TJ. Turmeric and cinnamon dominate in antioxidant potential among four major spices. *J Spices Aromat Crops* 2017;26:27–34. <https://doi.org/10.25081/josac.2017.v26.i1.803>

- [46] Vidal-Casanella O, Núñez O, Granados M, Saurina J, Sentellas S. Analytical methods for exploring nutraceuticals based on phenolic acids and polyphenols. *Appl Sci* 2021;11:8276. <https://doi.org/10.3390/app11188276>
- [47] Brnawi WI, Hettiarachchy NS, Horax R, Kumar-Phillips G, Seo H, Marcy J. Comparison of cinnamon essential oils from leaf and bark with respect to antimicrobial activity and sensory acceptability in strawberry shake. *J Food Sci* 2018;83:475–80. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14041>
- [48] Ekpo JS, Okon UM. Effects of multiple spices and processing methods on pork organoleptic quality. 2024. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5299946/v1>
- [49] So Y, Lin P, Ho L, Lee K, Lin C, Wang L, et al. Interaction statistical analysis of instrumental and sensory data for Ethiopian Yirgacheffe coffee: unveiling quality control metrics and optimal storage conditions. *J Food Sci* 2025;90:e70275. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70275>
- [50] Huang Y. Introdu research on the influencing factors of diabetes prediction model among Pima Indian Heritages female data. *Highlights Sci Eng Technol* 2024;99:79–83. <https://doi.org/10.54097/rf0dyd88>
- [51] Weine E, McPeek MS, Abney M. Application of equal local levels to improve Q-Q plot testing bands with R package qqconf. *J Stat Softw* 2023;106. <https://doi.org/10.18637/jss.v106.i10>
- [52] Park T, Lee S. Model diagnostic plots for repeated measures data. *Biom J* 2004;46:441–52. <https://doi.org/10.1002/bimj.200210044>
- [53] Idowu BN, Kayode OR. Discriminating between ordinary least squares estimation method and some robust estimation regression methods. *Int J Comput Appl Math Comput Sci* 2023;3:72–9. <https://doi.org/10.37394/232028.2023.3.9>
- [54] Osae R, Alolga RN, Essilfie G, Osei-Adjei G, Baduweh CA, Yarley OPN, et al. Variation in bioactive phytochemicals and sensory attributes of osmosonic convective dried ginger from four African countries. *J Sci Food Agric* 2020;100:3164–72. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10351>
- [55] Gupta S, Pandotra P, Ram G, Anand R, Gupta AP, Husain M, et al. Composition of a monoterpenoid-rich essential oil from the rhizome of *Zingiber officinale* from North Western Himalayas. *Nat Prod Commun* 2011;6:1934578X1100600122. <https://doi.org/10.1177/1934578X1100600122>
- [56] Hasmita I, Adisalamun A, Nurul Alam P, Satriana S, Mahlinda M, Supardan MD. Effect of drying and hydrodistillation time on the amount of ginger essential oil. *Int J Adv Sci Eng Inf Technol* 2015;5:300–4. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.5.5.567>
- [57] Segura-Borrego MP, Ubeda C, Pastor O, Callejón RM, Morales ML. Could the aroma of spices produce a cross-modal enhancement of food saltiness and contribute to reducing salt intake? *J Sci Food Agric* 2024;104:3894–901. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13270>
- [58] Yokomi N, Ito M. Influence of composition upon the variety of tastes in *Cinnamomi* cortex. *J Nat Med* 2009;63:261–6. <https://doi.org/10.1007/s11418-009-0326-8>
- [59] Wohlmuth H, Leach DN, Smith MK, Myers SP. Gingerol content of diploid and tetraploid clones of ginger (*Zingiber officinale*). *J Agric Food Chem* 2005;53:5772–8. <https://doi.org/10.1021/jf050435b>