Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2026,
Volumen 10, Número 4.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i4

DESARROLLO Y OPTIMIZACIÓN EXPLORATORIA MULTIRRESPUESTA DE UN DULCE ENCHILADO CON HARINA DE CÁSCARA DE GRANADA MEDIANTE UN DISEÑO DE MEZCLAS DE VÉRTICES EXTREMOS.

DEVELOPMENT AND EXPLORATORY MULTI-RESPONSE OPTIMIZATION OF A CHILI-COATED CANDY MADE WITH POMEGRANATE PEEL FLOUR USING AN EXTREME VERTEX MIXTURE DESIGN.

Vianney Nuñez-Escudero
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Jesús Guadalupe Pérez-Flores
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Laura García-Curiel
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Emmanuel Pérez-Escalante
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Elizabeth Contreras-López
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Judith Jaimez-Ordaz
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Cecilia Johana Chagoya-Ruiz
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i4.25644

Desarrollo y optimización exploratoria multirrespuesta de un dulce enchilado con harina de cáscara de granada mediante un diseño de mezclas de vértices extremos.

Vianney Nuñez-Escudero[1]
nu378912@uaeh.edu.mx
https://orcid.org/0009-0005-2103-3156
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
México

Jesús Guadalupe Pérez-Flores
jesus_perez@uaeh.edu.mx
https://orcid.org/0000-0002-9654-3469
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
México

Laura García-Curiel
laura.garcia@uaeh.edu.mx
https://orcid.org/0000-0001-8961-2852
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
México

Emmanuel Pérez-Escalante
emmanuel_perez@uaeh.edu.mx
https://orcid.org/0000-0002-4268-9753
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
México

Elizabeth Contreras-López
elizac@uaeh.edu.mx
https://orcid.org/0000-0002-9678-1264
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
México

Judith Jaimez-Ordaz
jjaimez@uaeh.edu.mx
https://orcid.org/0000-0001-6655-0759
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
México

Cecilia Johana Chagoya-Ruiz
ch420331@uaeh.edu.mx
https://orcid.org/0009-0007-2251-8432
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
México

RESUMEN
La harina de cáscara de granada aporta fibra y compuestos fenólicos, aunque su sabor, astringencia y efecto sobre la textura pueden limitar su incorporación directa. El objetivo fue formular un dulce enchilado y describir el efecto conjunto de la harina de cáscara de granada (x_1), una mezcla de chiles guajillo y árbol en proporción 2:1 (x_2), así como del contenido de sal (x_3), sobre la aceptabilidad general, la pungencia y la salinidad. Se evaluaron nueve formulaciones mediante una escala hedónica de 5 categorías. Las frecuencias ponderadas se acumularon por formulación y se ajustaron modelos cúbicos especiales. La harina de granada presentó 7.35 % de humedad, 5.37 % de cenizas, 4.26 % de proteína, 1.45 % de grasa y 54.26 % de fibra. Las puntuaciones acumuladas variaron de 79 a 122 para aceptabilidad, de 78 a 116 para pungencia y de 73 a 108 para salinidad. El mejor desempeño se observó para $x_1 = 0.50$, $x_2 = 0.40$ y $x_3 = 0.10$. La rutina multirrespuesta propuso 49.62 g de harina, 43.67 g de chile y 13.71 g de sal por cada 107 g de la fase variable. Esta combinación delimita una candidata computacional de mejor desempeño relativo; su aceptación y capacidad predictiva requieren confirmación mediante lotes independientes y datos sensoriales individuales.

Palabras clave: Harina de cáscara de granada; confitería enchilada; diseño de mezclas; optimización multirrespuesta.

[1] Autor principal
Correspondencia: ch420331@uaeh.edu.mx

Development and exploratory multi-response optimization of a chili-coated candy made with pomegranate peel flour using an extreme vertex mixture design.

ABSTRACT

Pomegranate peel flour provides fiber and phenolic compounds, although its flavor, astringency, and effect on texture may limit its direct incorporation. The objective was to formulate a chili-coated candy and describe the combined effect of pomegranate peel flour (x_1), a mixture of guajillo and árbol chilies in a 2:1 ratio (x_2), and salt content (x_3) on overall acceptability, pungency, and saltiness. Nine formulations were evaluated using a 5-category hedonic scale. The weighted frequencies were accumulated by formulation, and special cubic models were fitted. Pomegranate peel flour contained 7.35% moisture, 5.37% ash, 4.26% protein, 1.45% fat, and 54.26% fiber. The cumulative scores ranged from 79 to 122 for acceptability, from 78 to 116 for pungency, and from 73 to 108 for saltiness. The best performance was observed for $x_1 = 0.50$, $x_2 = 0.40$, and $x_3 = 0.10$. The multi-response routine proposed 49.62 g of flour, 43.67 g of chili, and 13.71 g of salt per 107 g of the variable phase. This combination identifies a computational candidate with the best relative performance; its acceptability and predictive capability require confirmation using independent batches and individual sensory data.

***Keywords*:** Pomegranate peel flour; chili confectionery; mixture design; multiresponse optimization.

Artículo recibido 16 junio 2026
Aceptado para publicación: 22 agosto 2026

INTRODUCCIÓN

El procesamiento de granada genera una cáscara rica en polisacáridos estructurales, pectina y taninos hidrolizables, entre ellos punicalaginas, punicalina y derivados del ácido elágico. La concentración de estos componentes varía según el cultivar, la madurez, el secado, el tamaño de partícula y el método analítico. Por esa variabilidad, el comportamiento de la harina debe establecerse en la matriz en la que se incorpora y no extrapolarse a partir de una composición única (Azmat et al., 2024; Gullón et al., 2020; Siddiqui et al., 2024).

El uso de la cáscara integral modifica simultáneamente la composición y la estructura del alimento. La fibra aumenta la retención de agua y altera la consistencia, mientras que los compuestos fenólicos aportan amargor, astringencia y color. En pan, galletas, muffins y barras, las dosis moderadas propician una buena aceptación; sin embargo, al incrementar la concentración, surgen cambios de volumen, de textura, oscurecimiento y notas amargas. El límite sensorial depende de la formulación completa y del proceso, por lo que las proporciones aceptables en productos horneados no pueden trasladarse directamente a una confitería de alta concentración de azúcares e hidrocoloides (Abbas et al., 2025; García et al., 2023; Giri et al., 2024; Muhammad et al., 2023).

Un dulce enchilado integra dulzor, acidez, salinidad, astringencia, textura y una sensación pungente de naturaleza quimioestésica. La pungencia se transmite principalmente por las vías trigeminales, y su interacción con los gustos básicos depende del compuesto, de la concentración, de la matriz y de la habituación. En sistemas con piperina se ha observado un aumento de la salinidad en algunas formulaciones, acompañado de un mayor amargor o del predominio de la nota picante en otras. Esa evidencia orienta la interpretación, aunque no permite atribuir el mismo mecanismo a una mezcla de chiles ni asumir una relación lineal entre la cantidad de chile, la sal y el agrado (He et al., 2023; Moss et al., 2023).

Por otro lado, los diseños de mezclas son adecuados cuando el cambio de un ingrediente obliga a compensar las proporciones de los demás. Los diseños de vértices extremos acotan el estudio a las combinaciones factibles cuando existen límites de formulación, mientras que los modelos de Scheffé, los diagramas ternarios y las trayectorias de Piepel describen la respuesta dentro de ese dominio. Su utilidad predictiva depende de la replicación, de la evaluación de la falta de ajuste y de las corridas de

confirmación, por lo que un R^2 elevado en un diseño pequeño describe el ajuste del modelo, pero no sustituye la validación experimental (Galvan et al., 2021; Squeo et al., 2021).

Es así que el objetivo de este trabajo fue formular un dulce enchilado con harina de cáscara de granada y modelar, mediante un diseño de mezclas de vértices extremos y una optimización multirrespuesta, el efecto conjunto de las proporciones de harina de granada, mezcla de chiles y sal sobre la aceptabilidad general y el agrado asociado con la pungencia y la salinidad, para delimitar una composición de compromiso dentro del dominio estudiado y proponer una formulación candidata para su validación experimental.

METODOLOGÍA

Materias primas

Las granadas, los ingredientes y los aditivos alimentarios fueron proporcionados por una empresa de confitería ubicada en Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. La formulación base incluyó azúcar refinada, glucosa, agua, hidrocoloides y conservadores; estos componentes se mantuvieron constantes y no formaron parte del diseño. La fase variable estuvo constituida por harina de cáscara de granada, una mezcla de chile guajillo y chile de árbol en proporción 2:1 (m/m) y sal de mesa. La composición cuantitativa de la base se mantuvo bajo acuerdo de confidencialidad; las proporciones de los tres componentes experimentales se informaron en su totalidad.

Obtención de la harina de cáscara de granada

Las granadas se lavaron con solución jabonosa y la cáscara se retiró manualmente con un cuchillo de acero inoxidable. El material se ralló, se desinfectó con una solución comercial a base de plata coloidal, conforme a las instrucciones del fabricante, y se escurrió. La cáscara se mantuvo durante 20 min en NaCl al 2% (p/v) con agitación constante y, posteriormente, se escurrió y se enjuagó con agua. El material se distribuyó en charolas de acero inoxidable, se secó a 65 °C durante 12 h, se molió, se pasó por un tamiz de 0.50 mm y se almacenó en un recipiente hermético hasta su uso.

Las determinaciones se efectuaron por triplicado y se expresaron como media ± desviación estándar (g/100 g). La humedad se obtuvo por pérdida de masa en horno de convección a 105 °C hasta peso constante; las cenizas, por incineración en mufla; la proteína, por el método Kjeldahl con un factor de conversión de 6.25; y la grasa, mediante el principio gravimétrico de la norma ISO 6492:1999. La fibra

se determinó mediante el procedimiento gravimétrico consignado en la documentación experimental.

Elaboración de los prototipos

El centro del dulce se elaboró conforme al procedimiento artesanal proporcionado por la empresa participante. La harina, la mezcla de chiles y la sal se incorporaron en las cantidades definidas para cada corrida; el azúcar, la glucosa, el agua, los hidrocoloides y los conservadores permanecieron constantes. La pasta se mezcló con azúcar glass y se amasó hasta obtener una masa homogénea. Se formaron porciones de 10 a 20 g, se dejaron reposar al menos 1 h, se recubrieron con azúcar glass y se almacenaron en recipientes herméticos, en un lugar fresco y seco, hasta su evaluación.

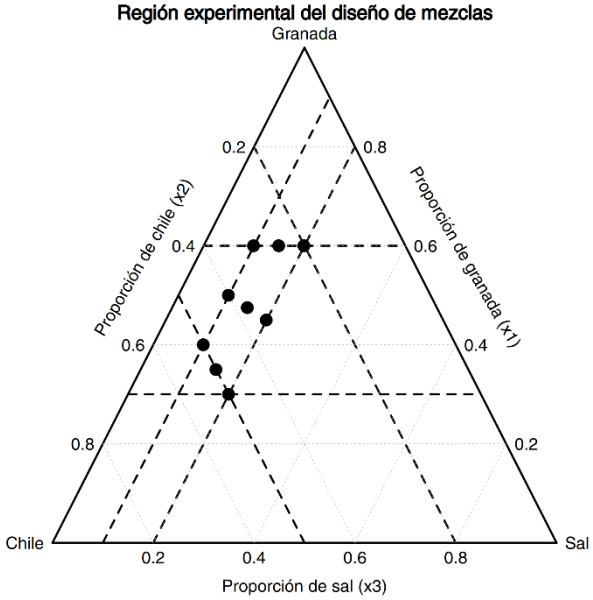
Diseño de mezclas

Se utilizó un diseño de vértices extremos con tres componentes, cuyas fracciones sumaron 1 en cada una de las formulaciones. La harina de cáscara de granada (x_1) representó una fracción de 0.30 a 0.60 de la mezcla; la mezcla de chiles (x_2) de 0.20 a 0.50; y la sal (x_3) de 0.10 a 0.20. Estas fracciones se escalaron a una fase variable de 107 g. El diseño se generó en R mediante la función ‘Xvert’ del paquete ‘mixexp’, con tres factores: límites superiores de 0.60, 0.50 y 0.20; límites inferiores de 0.30, 0.20 y 0.10; y grado de modelo igual a 1. El orden de las corridas se aleatorizó después de establecer una semilla reproducible con ‘set.seed(123)’. La matriz experimental se presenta en la Tabla 1 y la región factible, definida por los límites de los componentes, se muestra en la Figura 1.

Tabla 1. Matriz experimental del diseño de vértices extremos.

Orden exportado	x_1	x_2	x_3	Harina (g)	Chile (g)	Sal (g)
3	0.6	0.3	0.1	64.2	32.1	10.7
6	0.35	0.5	0.15	37.45	53.5	16.05
9	0.48	0.38	0.15	50.83	40.13	16.05
2	0.3	0.5	0.2	32.1	53.5	21.4
8	0.45	0.35	0.2	48.15	37.45	21.4
5	0.6	0.25	0.15	64.2	26.75	16.05
7	0.5	0.4	0.1	53.5	42.8	10.7
1	0.6	0.2	0.2	64.2	21.4	21.4
4	0.4	0.5	0.1	42.8	53.5	10.7

Figura 1. Región factible para el diseño de vértices extremos. Los puntos corresponden a las nueve formulaciones; los ejes representan las fracciones de harina de cáscara de granada (x_1), de mezcla de chiles (x_2) y de sal (x_3).



Evaluación sensorial

Cada formulación fue evaluada por 50 consumidores de conveniencia, estudiantes de la Licenciatura en Química de Alimentos de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Las muestras se presentaron en recipientes individuales con códigos de tres dígitos y las respuestas se registraron en un formulario electrónico. Se aplicó la misma escala hedónica de cinco categorías a la aceptabilidad general, la pungencia y la salinidad: 1 = me disgusta mucho, 2 = no me gusta, 3 = ni me gusta ni me disgusta, 4 = me gusta y 5 = me gusta mucho. En consecuencia, las dos últimas variables expresan el agrado por el atributo evaluado y no su intensidad.

Para cada formulación y atributo, la frecuencia de cada categoría se multiplicó por su coeficiente ordinal y los productos se sumaron (Ecuación 1).

$$y = \sum_{k=1}^{5} k\, n_k \qquad \text{Ec. 1}$$

Donde n_k es el número de consumidores que seleccionaron la categoría k. Las variables de respuesta fueron puntuaciones hedónicas acumuladas, con un intervalo teórico de 50 a 250 puntos y una referencia neutral de 150. La agregación generó una observación por formulación y por atributo; la variación entre consumidores no quedó disponible para el modelado.

Modelado de las respuestas

Los tres archivos de respuesta se analizaron en R con mixexp, stats, ggplot2, dplyr, Rsolnp y scatterplot3d. Para cada atributo se ajustó por mínimos cuadrados ordinarios un modelo cúbico especial sin intercepto:

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

La adecuación local se resumió mediante R^2, R^2 ajustado, error estándar residual, estadístico F global y su valor p. Se inspeccionaron los residuos frente a los valores ajustados, el gráfico Q-Q, la escala-localización y los residuos frente al apalancamiento. Cada modelo estimó siete parámetros a partir de nueve formulaciones y dejó dos grados de libertad residuales. Como no hubo puntos de mezcla replicados, no fue posible separar el error puro de la falta de ajuste. Las pruebas individuales de coeficientes se consideraron exploratorias y la interpretación se centró en la superficie del dominio.

Los contornos se generaron con 'ModelPlot()' en componentes reales y pseudocomponentes, empleando los límites del diseño, diez cortes y contornos rellenos. La transformación a pseudocomponentes redistribuye la región restringida para facilitar su lectura y no modifica las formulaciones ensayadas. Los cambios en la respuesta a las direcciones de mezcla se visualizaron mediante 'EffPlot()'.

Optimización multirrespuesta

La rutina proporcionada normalizó las predicciones de cada modelo respecto de los mínimos y máximos observados en las nueve formulaciones. La función compuesta trató la aceptabilidad y la puntuación de pungencia como respuestas de incremento, y la puntuación de salinidad como respuesta penalizada (Ecuaciones 3 y 4):

$$F(x) = A_N(x) + P_N(x) - S_N(x) \quad \text{Ec. 3}$$

Con:

$$R_N(x) = \frac{\hat{R}(x) - \hat{R}_{min}}{\hat{R}_{max} - \hat{R}_{min}} \quad \text{Ec. 4}$$

La búsqueda utilizó 100 inicializaciones aleatorias, límites iguales a los del diseño, un cierre unitario y el solucionador 'solnp'. Las soluciones exportadas se clasificaron por dominancia, maximizando la

aceptabilidad y la pungencia y minimizando la puntuación de salinidad. La formulación consignada en resultados se reportó sin volver a ejecutar el algoritmo. Dado que la salinidad se evaluó mediante anclajes hedónicos, su penalización no equivale a reducir la intensidad salada ni el contenido de sodio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Composición proximal de la harina

La harina de cáscara de granada presentó una humedad de 7.35 ± 0.17 g/100 g, un contenido de cenizas de 5.37 ± 0.52 g/100 g, una concentración de proteína de 4.26 ± 0.68 g/100 g, un contenido de grasa total de 1.45 ± 0.37 g/100 g y un contenido de fibra cruda de 54.26 ± 1.88 g/100 g (Tabla 2). El perfil corresponde a un polvo con baja fracción lipídica y predominio de material fibroso. La elevada proporción de fibra es compatible con una mayor absorción de agua y con cambios en la consistencia al incorporarse el ingrediente a una matriz alimentaria (Abbas et al., 2025; Azmat et al., 2024).

Tabla 2. Composición proximal de la harina de cáscara de granada.

Componente	Contenido (g/100 g)
Humedad	7.35 ± 0.17
Cenizas	5.37 ± 0.52
Proteína	4.26 ± 0.68
Grasa	1.45 ± 0.37
Fibra cruda	54.26 ± 1.88

Los valores previamente reportados para el análisis proximal de la cáscara de granada abarcan un amplio rango. Un procedimiento cercano al empleado en el presente estudio, con pretratamiento salino, secado a 65 °C y tamiz de 0.5 mm, reportó 7.27% de humedad, 4.32% de cenizas y 17.31% de fibra cruda; en otros cultivares, la fibra dietética se situó entre 33.10 y 62.09%. La diferencia respecto de 54.26 g/100 g puede deberse al cultivar y, especialmente, a que la fibra cruda y la fibra dietética no son mediciones equivalentes. La comparación debe conservar esa distinción analítica (Abbas et al., 2025; Azmat et al., 2024; Giri et al., 2024).

La fracción fibrosa también tiene consecuencias tecnológicas. En muffins, el 8% de polvo de cáscara elevó la absorción de agua y la viscosidad del batido, redujo el volumen y modificó la estructura de

poros; en pan y galletas, la respuesta sensorial varió con la dosis y con el efecto del polvo sobre el color y la textura. En este estudio, la harina representa entre 30 y 60% de la fase variable, pero su porcentaje en el dulce completo no puede calcularse porque la base constante está protegida por confidencialidad. Por ello, las comparaciones con porcentajes de incorporación en otros alimentos son cualitativas (García et al., 2023; Giri et al., 2024; Muhammad et al., 2023).

El valor de humedad describe el estado del ingrediente en el momento del análisis, pero no permite inferir la estabilidad microbiológica, ya que no se determinó la actividad de agua. El contenido de cenizas puede incluir minerales propios del tejido y residuos del tratamiento con NaCl; la información disponible no permite distinguir entre ambas contribuciones. Tampoco se cuantificaron fenoles, punicalaginas ni la actividad antioxidante, por lo que el alcance composicional se limita a los componentes proximales medidos (Azmat et al., 2024; Gullón et al., 2020; Siddiqui et al., 2024).

Respuestas observadas

Las puntuaciones acumuladas variaron entre 79 y 122 para la aceptabilidad general, entre 78 y 116 para el agrado asociado a la pungencia y entre 73 y 108 para el agrado asociado a la salinidad (Tabla 3). Todas quedaron por debajo de 150 puntos, un valor equivalente a 50 respuestas en la categoría neutral de la escala. La formulación $x_1 = 0.50$, $x_2 = 0.40$ y $x_3 = 0.10$ obtuvo las puntuaciones más altas del conjunto, con 122, 116 y 108 puntos, respectivamente; estos valores la sitúan como la alternativa de mejor desempeño relativo entre las nueve mezclas evaluadas, sin lograr la aceptación total del grupo (Cano-Lamadrid et al., 2020; García et al., 2023).

Tabla 3. Puntuaciones hedónicas acumuladas de las formulaciones experimentales.

x_1	x_2	x_3	**Aceptabilidad general**	**Pungencia (agrado)**	**Salinidad (agrado)**
0.600	0.3	0.1	121	97	100
0.350	0.5	0.15	79	78	73
0.475	0.38	0.15	120	102	104
0.300	0.5	0.2	102	97	97
0.450	0.35	0.2	101	92	89
0.600	0.25	0.15	82	91	86
0.500	0.4	0.1	122	116	108

x_1	x_2	x_3	Aceptabilidad general	Pungencia (agrado)	Salinidad (agrado)
0.600	0.2	0.2	79	84	79
0.400	0.5	0.1	103	95	92

La comparación entre las formulaciones con $x_1 = 0.60$ evidencia el carácter composicional de la respuesta. Con $x_2 = 0.30$ y $x_3 = 0.10$, la aceptabilidad alcanzó 121 puntos; al redistribuir chile y sal a 0.25/0.15 y 0.20/0.20, descendió a 82 y 79 puntos, respectivamente. La harina se mantuvo constante y el cambio conjunto de los demás componentes produjo una diferencia de 42 puntos. Este contraste impide asignar a x_1 un efecto fijo o independiente (Galvan et al., 2021; Squeo et al., 2021).

En las mezclas con $x_2 = 0.50$, las combinaciones (0.35, 0.50, 0.15), (0.30, 0.50, 0.20) y (0.40, 0.50, 0.10) registraron aceptabilidades de 79, 102 y 103 puntos, respectivamente. La mejora relativa se asoció con una menor proporción de sal y una mayor de harina, aunque ambos componentes cambiaron simultáneamente. La dirección resulta útil para orientar nuevas corridas, pero no permite establecer causalidad ni definir una regla univariada de formulación (Galvan et al., 2021; Squeo et al., 2021).

El máximo simultáneo de las tres respuestas indica que las puntuaciones hedónicas tendieron a desplazarse en la misma dirección. Como la escala evaluó el agrado, una puntuación más alta de pungencia o salinidad indica una valoración menos negativa del atributo, no una mayor intensidad. Las interacciones entre estímulos pungentes y salados son plausibles, aunque dependen del compuesto y del enfoque sensorial; la evidencia con piperina ha mostrado un aumento de la salinidad en escalas de intensidad y el predominio de la nota picante en mediciones temporales. Los datos disponibles hasta el momento no permiten determinar un mecanismo similar para la mezcla de chiles empleada (He et al., 2023; Moss et al., 2023).

Ajuste de los modelos cúbicos especiales

Los modelos globales fueron distintos de un modelo sin capacidad explicativa para la aceptabilidad ($F = 88.55$; $p = 0.01121$), la pungencia ($F = 245.3$; $p = 0.004065$) y la salinidad ($F = 136.9$; $p = 0.007272$). Los R^2 fueron de 0.9968-0.9988 y los R^2 ajustados, de 0.9855-0.9948; los errores estándar residuales fueron de 12.320, 6.889 y 8.970, respectivamente (Tabla 4). Estas métricas describen el ajuste local de las nueve puntuaciones agregadas (Galvan et al., 2021; Squeo et al., 2021).

Tabla 4. Métricas de ajuste para los modelos cúbicos especiales.

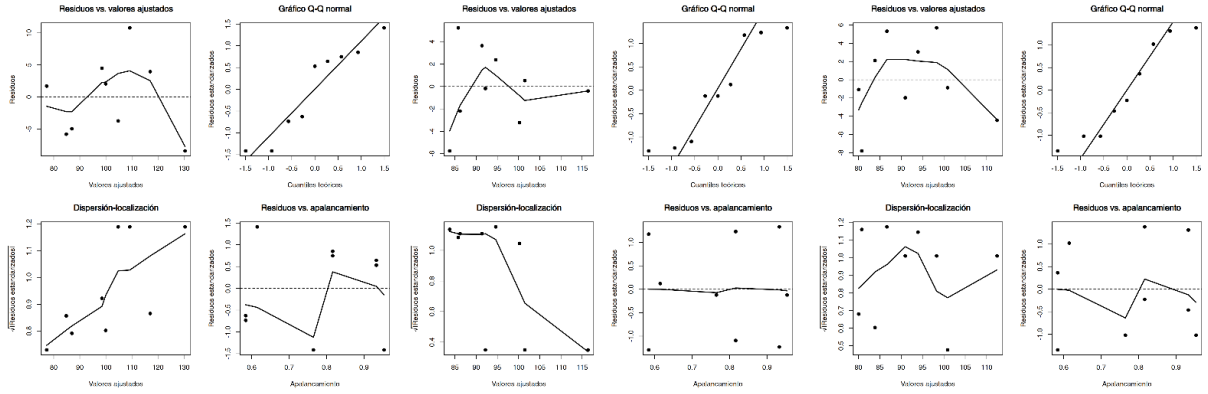
Respuesta	R^2	R^2 ajustado	Error residual	F global	p global	gl residuales
Aceptabilidad general	1	0.99	12.32	88.55	0.01121	2
Pungencia (agrado)	1	0.99	6.89	245.3	0.004065	2
Salinidad (agrado)	1	0.99	8.97	136.9	0.007272	2

La magnitud de los R^2 debe interpretarse junto con la estructura del diseño. Se estimaron siete coeficientes con nueve observaciones, y dos residuos respaldaron la estimación del error. Además, la ausencia de réplicas de formulación impidió realizar una prueba de falta de ajuste frente a un error puro. El estadístico F global indica que la superficie reproduce la variación dentro del conjunto analizado; no establece la estabilidad de los coeficientes ni la capacidad predictiva fuera de ese conjunto (Galvan et al., 2021; Squeo et al., 2021).

Ningún coeficiente individual alcanzó $p < 0.05$. La dependencia impuesta por $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ y el número reducido de grados de libertad ensanchan los errores estándar y dificultan la lectura término por término. En un modelo de mezclas, los coeficientes lineales tampoco corresponden a las pendientes independientes de un diseño factorial. La interpretación defendible se apoya en contrastes entre formulaciones, contornos y trayectorias dentro del dominio (Galvan et al., 2021; Squeo et al., 2021).

Los diagnósticos de la Figura 2 no muestran una desviación única que domine el ajuste, pero su capacidad para detectar incumplimientos es baja con solo nueve observaciones. La aceptabilidad presentó la mayor dispersión residual, mientras que la pungencia mostró el menor error estándar. Estas diferencias pueden reflejar que el agrado general integra más fuentes de variación que la valoración de un atributo específico; la evidencia disponible no basta para considerar robustos los supuestos ni la predicción (Galvan et al., 2021; Squeo et al., 2021).

Figura 2. Diagnósticos de los modelos de aceptabilidad (a), pungencia (b) y salinidad (c). Cada bloque reúne residuos frente a valores ajustados, gráfico Q-Q normal, escala-localización y residuos frente al apalancamiento.



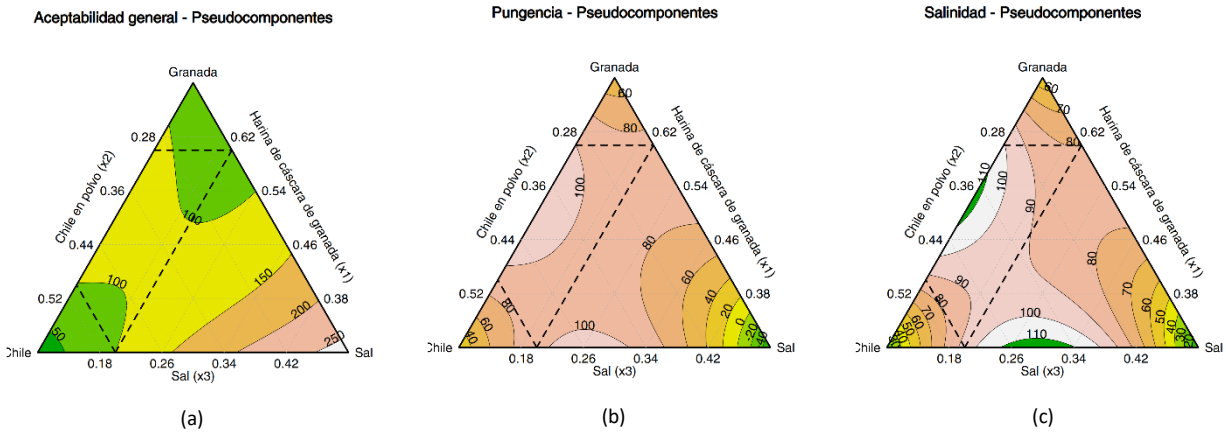
(a) (b) (c)

Superficies en pseudocomponentes y trayectorias de Piepel

Los diagramas de la Figura 3 presentan las respuestas en pseudocomponentes y limitan la lectura a la región realmente accesible. Las curvaturas son compatibles con interacciones binarias y ternarias, aunque la densidad visual de los contornos proviene de una superficie con siete parámetros y no de una malla experimental densa. Los mapas deben usarse para localizar zonas de mejor desempeño relativo y diseñar verificaciones, no para atribuir precisión continua a toda la representación gráfica del diseño (Galvan et al., 2021; Squeo et al., 2021).

La zona de mayor aceptabilidad relativa se extendió hacia x_3 bajo y combinaciones intermedias-altas de harina y chile. Las formulaciones (0.50, 0.40, 0.10) y (0.60, 0.30, 0.10) alcanzaron 122 y 121 puntos, respectivamente, pero ambas quedaron por debajo del punto de neutralidad (150 puntos). En productos enriquecidos con cáscara de granada también se han observado ventanas estrechas de mayor aceptación, seguidas de pérdidas asociadas al amargor, al color o a la textura al aumentar la dosis. En este dulce, la superficie delimita una región para reformulación y no una zona de aceptación comprobada (Abbas et al., 2025; García et al., 2023; Giri et al., 2024; Muhammad et al., 2023).

Figura 3. Diagramas ternarios de los pseudocomponentes de la aceptabilidad (a), la pungencia (b) y la salinidad (c). Las superficies representan puntuaciones hedónicas predichas por los modelos cúbicos especiales dentro del dominio restringido.



(a) (b) (c)

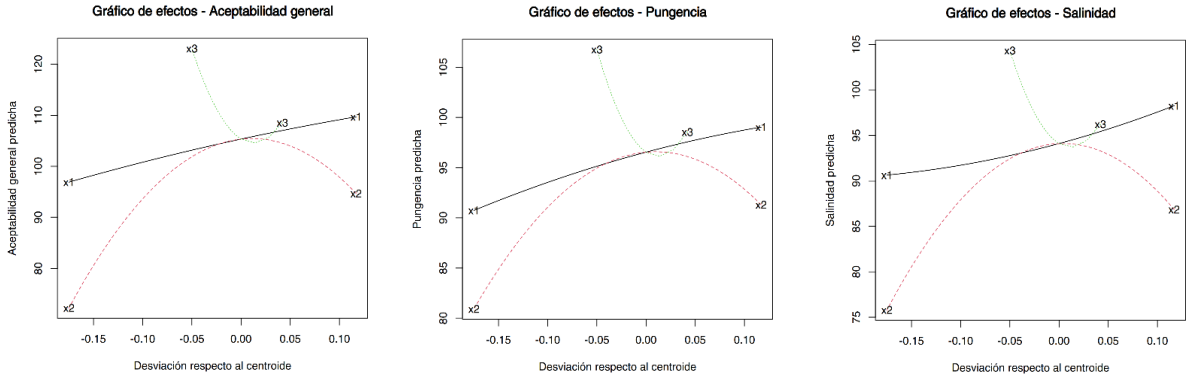
La superficie de pungencia corresponde al agrado atribuido a este atributo sensorial. La baja puntuación en la formulación con la proporción máxima de la mezcla de chiles confirma que la cantidad nominal del componente no se corresponde con una respuesta hedónica favorable. La liberación oral del estímulo, la composición de la matriz y la familiaridad de los consumidores pueden modificar la valoración. Sin una escala de intensidad ni una medición de capsaicinoides, el modelo no cuantifica la pungencia química ni la sensorial (He et al., 2023).

La salinidad tampoco siguió una relación monótona con x_3, y el puntaje más alto se observó en su límite inferior, como se muestra en la Figura 3. Dado el carácter hedónico de la variable, este patrón no indica que una menor cantidad de sal haya producido una mayor intensidad salada. La evidencia con piperina muestra que el picor puede modificar la salinidad percibida, pero también puede aumentar el amargor o dominar la experiencia temporal; la dirección depende de la concentración y del método. La explicación del mecanismo de percepción requiere una evaluación de la intensidad diseñada para ese propósito (He et al., 2023; Moss et al., 2023).

Por otro lado, las trayectorias de la Figura 4 muestran el cambio predicho al desplazarse desde una mezcla de referencia hacia cada componente, manteniendo la proporción relativa de los otros dos componentes. Las curvas no representan efectos marginales independientes. Los tramos con mayor pendiente pueden servir para elegir formulaciones de confirmación cerca de la zona de mejor desempeño y en sectores donde pequeñas variaciones de composición producen cambios significativos en la predicción. Con dos grados de libertad residuales, esta verificación forma parte del desarrollo del modelo

(Galvan et al., 2021; Squeo et al., 2021).

Figura 4. Efectos de la dirección de Piepel sobre la aceptabilidad (a), la pungencia (b) y la salinidad (c), expresados como desplazamientos respecto del centroide de la región.



(a) (b) (c)

Optimización multirrespuesta

La exploración multirespuesta generó soluciones que combinan las tres puntuaciones modeladas (Figura 5). La candidata reportada contiene 49.62 g de harina, 43.67 g de mezcla de chiles y 13.71 g de sal por cada 107 g de fase variable, equivalentes a $x_1 = 0.4637$, $x_2 = 0.4081$ y $x_3 = 0.1281$, con diferencias debidas al redondeo. Las predicciones fueron de 114.34 puntos para aceptabilidad, 105.82 para pungencia y 101.93 para salinidad (Tabla 5).

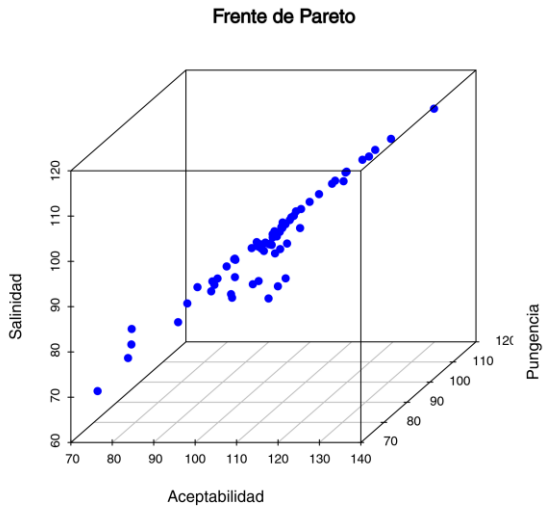
Tabla 5. Formulación candidata y puntuaciones predichas mediante optimización multirrespuesta.

Componente o respuesta	**Valor**
Harina de cáscara de granada	49.62 g
Mezcla de chiles	43.67 g
Sal	13.71 g
Aceptabilidad predicha	114.34 puntos
Pungencia predicha (agrado)	105.82 puntos
Salinidad predicha (agrado)	101.93 puntos

La candidata se encuentra próxima a (0.475, 0.375, 0.150) y (0.500, 0.400, 0.100), dos formulaciones con resultados experimentales relativamente altos. Sus tres predicciones permanecen dentro de los intervalos observados, por lo que corresponden a una interpolación. La nube de la Figura 5 sigue principalmente una diagonal ascendente: las respuestas tienden a aumentar conjuntamente y el frente

ofrece un margen limitado de intercambio entre ellas (Galvan et al., 2021; Squeo et al., 2021).

Figura 5. Distribución tridimensional de las soluciones clasificadas como no dominadas. Los ejes corresponden a puntuaciones hedónicas predichas de aceptabilidad, pungencia y salinidad bajo las direcciones establecidas en la rutina.



La aceptabilidad predicha de 114.34 puntos es inferior al máximo observado de 122 y se mantiene por debajo de la referencia neutral de 150. La rutina no identificó una formulación con la aceptación esperada; seleccionó una combinación que mejor cumple el criterio normalizado impuesto a tres superficies casi saturadas. El término óptimo debe reservarse hasta comprobar la respuesta con lotes independientes y consumidores evaluados de manera individual (Galvan et al., 2021; Squeo et al., 2021). La principal restricción del criterio radica en la dirección asignada a la salinidad. Penalizar la puntuación hedónica de la salinidad implica un menor agrado hacia ese atributo, y no una menor intensidad ni una menor concentración de sodio. Un planteamiento posterior deberá maximizar la aceptación, mantener la pungencia y la salinidad dentro de los intervalos de intensidad deseados, y añadir una medición analítica de sodio cuando el propósito sea reducirla. La pungencia también conviene tratarla como objetivo de adecuación para un segmento definido, en lugar de maximizarla de forma general (Cano-Lamadrid et al., 2020; He et al., 2023; Moss et al., 2023).

Alcance tecnológico y validación requerida

El estudio establece que la harina puede incorporarse a la fase variable y que la combinación de harina, chile y sal modifica las respuestas hedónicas. La información confidencial de la base impide expresar la harina como porcentaje del dulce total y limita la comparación directa con otros productos. Tampoco se

analizaron la fibra del producto terminado, los compuestos fenólicos, la bioaccesibilidad ni la actividad antioxidante; por ello, el alcance tecnológico se limita a la formulación experimental y a la composición proximal de la harina (Azmat et al., 2024; Gullón et al., 2020; Siddiqui et al., 2024).

La experiencia con pan, galletas, muffins, barras y caramelos confirma que el efecto de la cáscara depende de la forma de incorporación y de la matriz. Las mejores dosis de polvo integral en productos horneados fueron moderadas, mientras que la pectina extraída pudo emplearse en caramelos a concentraciones mucho menores y con una función tecnológica distinta. En el dulce enchilado, el hecho de que todas las puntuaciones quedaron por debajo de la neutralidad indica que la región estudiada requiere ajustes adicionales de la base o de los límites de mezcla antes de plantear una formulación comercial (Abbas et al., 2025; Cano-Lamadrid et al., 2020; García et al., 2023; Giri et al., 2024; Mahmoud & Azab, 2025; Muhammad et al., 2023).

La siguiente etapa debe preparar la formulación candidata y las formulaciones vecinas en lotes independientes, registrar las respuestas individuales y analizar el consumidor, la formulación y el lote en un mismo modelo. También conviene utilizar escalas separadas para el agrado y la intensidad, documentar la aleatorización, el control de arrastre y el consentimiento, y medir la actividad de agua, la textura, el color, el sodio y la fibra del producto terminado. Estas acciones permitirán determinar si la región de mejor desempeño relativa puede transformarse en un producto aceptado y si las predicciones conservan su exactitud fuera de las nueve corridas originales (Cano-Lamadrid et al., 2020; Galvan et al., 2021; Squeo et al., 2021).

CONCLUSIONES

La respuesta sensorial a las formulaciones de dulce establecidas dependió del equilibrio entre la harina de cáscara de granada, la mezcla de chiles y la sal. Las formulaciones con proporciones intermedias o altas de harina y chile y con menor contenido de sal mostraron el mejor desempeño relativo, aunque ninguna alcanzó un nivel suficiente para considerarse aceptada por los consumidores. La redistribución de los componentes modificó las respuestas hedónicas y permitió delimitar una composición de compromiso, por lo que la hipótesis se cumplió parcialmente. La formulación propuesta debe considerarse una candidata a reformulación y validación, dentro de una región experimental cuyo comportamiento solo puede sostenerse para las combinaciones evaluadas.

Las perspectivas se orientan a comprobar esta región mediante lotes independientes, réplicas de formulación y mezclas vecinas a la candidata. La evaluación sensorial deberá analizar las respuestas individuales y diferenciar el agrado de la intensidad percibida de la pungencia y de la salinidad. La incorporación de mediciones de textura, color, actividad de agua, sodio y fibra en el producto terminado permitirá establecer su reproducibilidad, su estabilidad tecnológica y la posibilidad de lograr una aceptación sensorial adecuada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbas, R., Aamir, M., Saeed, F., Shankar, A., Kaur, J., Nadeem, R., Chauhan, A. S., Imran, A., Afzaal, M., & Kinki, A. B. (2025). Development and nutritional evaluation of pomegranate peel enriched bars. *PLOS ONE*, *20*(1), e0315830. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0315830

Azmat, F., Safdar, M., Ahmad, H., Khan, M. R. J., Abid, J., Naseer, M. S., Aggarwal, S., Imran, A., Khalid, U., Zahra, S. M., Islam, F., Cheema, S. A., Shehzadi, U., Ali, R., Kinki, A. B., Ali, Y. A., & Suleria, H. A. R. (2024). Phytochemical profile, nutritional composition of pomegranate peel and peel extract as a potential source of nutraceutical: A comprehensive review. *Food Science & Nutrition*, *12*(2), 661–674. https://doi.org/10.1002/fsn3.3777

Cano-Lamadrid, M., Calín-Sánchez, Á., Clemente-Villalba, J., Hernández, F., Carbonell-Barrachina, Á. A., Sendra, E., & Wojdyło, A. (2020). Quality Parameters and Consumer Acceptance of Jelly Candies Based on Pomegranate Juice "Mollar de Elche". *Foods*, *9*(4), 516. https://doi.org/10.3390/foods9040516

Galvan, D., Effting, L., Cremasco, H., & Conte-Junior, C. A. (2021). Recent Applications of Mixture Designs in Beverages, Foods, and Pharmaceutical Health: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Foods*, *10*(8), 1941. https://doi.org/10.3390/foods10081941

García, P., Bustamante, A., Echeverría, F., Encina, C., Palma, M., Sanhueza, L., Sambra, V., Pando, M. E., & Jiménez, P. (2023). A Feasible Approach to Developing Fiber-Enriched Bread Using Pomegranate Peel Powder: Assessing Its Nutritional Composition and Glycemic Index. *Foods*, *12*(14), 2798. https://doi.org/10.3390/foods12142798

Giri, N. A., Bhangale, A., Gaikwad, N. N., Manjunatha, N., Raigond, P., & Marathe, R. A. (2024). Comparative study on effect of pomegranate peel powder as natural preservative and chemical

preservatives on quality and shelf life of muffins. *Scientific Reports*, *14*(1), 10307. https://doi.org/10.1038/s41598-024-61085-4

Gullón, P., Astray, G., Gullón, B., Tomasevic, I., & Lorenzo, J. M. (2020). Pomegranate Peel as Suitable Source of High-Added Value Bioactives: Tailored Functionalized Meat Products. *Molecules*, *25*(12), 2859. https://doi.org/10.3390/molecules25122859

He, W., Liang, L., & Zhang, Y. (2023). Pungency Perception and the Interaction with Basic Taste Sensations: An Overview. *Foods*, *12*(12), 2317. https://doi.org/10.3390/foods12122317

Mahmoud, M. H., & Azab, D. E.-S. H. (2025). Upcycling mango and pomegranate peel as pectin source: Characterization, fat substitute and retarded lipid oxidation in caramel candy. *Discover Food*, *5*(1), 37. https://doi.org/10.1007/s44187-025-00295-9

Moss, R., Fisher, C., Gorman, M., Knowles, S., LeBlanc, J., Ritchie, C., Schindell, K., Ettinger, L., & McSweeney, M. B. (2023). Effect of Piperine on Saltiness Perception. *Foods*, *12*(2), 296. https://doi.org/10.3390/foods12020296

Muhammad, A., Dayisoylu, K. S., Pei, J., Khan, M. R., Salman, M., Ahmad, R., Ullah, H., & Noor, G. R. (2023). Compositional analysis of natural pomegranate peel powder dried by different methods and nutritional and sensory evaluation of cookies fortified with pomegranate peel powder. *Frontiers in Nutrition*, *10*, 1118156. https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1118156

Siddiqui, S. A., Singh, S., & Nayik, G. A. (2024). Bioactive compounds from pomegranate peels—Biological properties, structure–function relationships, health benefits and food applications – A comprehensive review. *Journal of Functional Foods*, *116*, 106132. https://doi.org/10.1016/j.jff.2024.106132

Squeo, G., De Angelis, D., Leardi, R., Summo, C., & Caponio, F. (2021). Background, Applications and Issues of the Experimental Designs for Mixture in the Food Sector. *Foods*, *10*(5), 1128. https://doi.org/10.3390/foods10051128