

**TACLLA**

revistas.unf.edu.pe/taclla

<https://doi.org/10.57063/rcitac.v2i1.269>**FONDO EDITORIAL UNF**

ARTÍCULO ORIGINAL



Optimización de queques enriquecidos con harina de mashua negra (*Tropaeolum tuberosum*) mediante diseño compuesto central rotatable: efecto de la concentración y la temperatura de horneado sobre la aceptabilidad sensorial

Optimization of cakes enriched with black mashua flour (*Tropaeolum tuberosum*) using a central composite rotatable design: effect of concentration and baking temperature on sensory acceptability

Ketty Roxana Gil-Terrones¹ ID; Víctor Hugo Romero-Ibáñez¹ ID; Paul Alexis Sisniegas-Gálvez¹ ID; Nilson Deonil Campos-Vásquez¹ ID; Elmer Yampier Zamora Sánchez^{1*} ID

1 Laboratorio de Ingeniería Agroindustrial, Facultad Ciencias agropecuarias, Universidad Nacional De Trujillo, Avenida Juan Pablo II S/N, San Andrés, Trujillo13001, Perú.

*Autor de correspondencia: Elmer Yampier Zamora-Sánchez - ezamora@unitru.edu.pe

Received: 14 May 2026. Accepted: 29 May 2026. Published: 30 June 2026.

Abstract

This research examined how baking conditions (temperature) and the proportion of black mashua flour (*Tropaeolum tuberosum*) influence the sensory response and overall preference of cakes formulated by partially replacing conventional wheat flour. The experimental analysis was conducted using a two-factor Central Composite Rotatable Design (CCRD), with black mashua flour concentration, X1 (3–21%), and baking temperature, X2 (100–170 °C), resulting in 11 experimental treatments. The dependent variable was overall acceptability, assessed using a 10-cm unstructured hedonic scale with 90 untrained panelists. After processing the data with the statistical package Statistica v7.0, it was found that the variable with the critical impact on consumer satisfaction was baking temperature, showing significance in both its linear and quadratic components ($p < 0.05$). Conversely, neither the percentage of substitution of the Andean tuber nor the combined effect of the factors showed statistical significance ($p > 0.05$). The goodness of fit of the second-order polynomial model was confirmed by a coefficient of determination $R^2 = 0.859$ and adjusted $R^2 = 0.717$. The optimal treatment corresponded to a baking temperature of 155–160 °C and a black mashua flour concentration of 12–18.5%, with a maximum overall acceptability of 9.4/10 (treatment T8: 12%, 170 °C). The results demonstrate that black mashua flour can be incorporated into cake formulations with high sensory acceptability, constituting a value-added alternative for the Andean baking industry.

Keywords: central composite rotatable design; functional cake; black mashua flour; response surface methodology; sensory acceptability; *Tropaeolum tuberosum*.

Resumen

En esta investigación se examinó cómo influyen las condiciones de horneado (temperatura) y la proporción de harina de mashua negra (*Tropaeolum tuberosum*) en la respuesta sensorial y preferencia global de bizcochos formulados mediante el reemplazo parcial de la harina de trigo convencional. El análisis experimental se condujo a la utilización del Diseño Compuesto Central Rotatable (DCCR) de dos factores, concentración de harina de mashua negra, X1 (3–21 %), y temperatura de horneado, X2 (100–170 °C) —, generando 11 tratamientos experimentales. La variable dependiente fue la aceptabilidad general, evaluada mediante una escala hedónica no estructurada de 10 cm con 90 panelistas no entrenados. Tras procesar los datos con el paquete estadístico Statistica v7.0, se evidenció que la variable con impacto crítico sobre el agrado del consumidor fue la temperatura de cocción, manifestando significancia tanto en su componente lineal como cuadrático ($p < 0.05$). Por el contrario, ni el porcentaje de sustitución del tubérculo andino ni el efecto combinado de los factores demostraron tener relevancia estadística ($p > 0.05$). La bondad de ajuste del modelo polinomial de segundo orden quedó ratificada por un coeficiente de determinación $R^2 = 0.859$ y $R^2_{ajustado} = 0.717$. El tratamiento óptimo correspondió a una temperatura de horneado de 155–160 °C y una concentración de harina de mashua negra de 12–18.5 %, con una aceptabilidad general máxima de 9.4/10 (tratamiento T8: 12 %, 170 °C). Los resultados demuestran que la harina de mashua negra puede incorporarse en formulaciones de queque con alta aceptabilidad sensorial, constituyendo una alternativa de valor agregado para la industria de panificación andina.

Palabras Clave: aceptabilidad sensorial; diseño compuesto central rotatable; harina de mashua negra; metodología de superficie de respuesta; *Tropaeolum tuberosum*; queque funcional.

Cite this article:

Gil Terrones, K.R.; Romero Ibáñez, V.H.; Sisniegas Galvez, P.A.; Campos Vásquez, N.D. y Zamora Sánchez, E.Y. Optimización de queques enriquecidos con harina de mashua negra (*Tropaeolum tuberosum*) mediante diseño compuesto central rotatable: efecto de la concentración y la temperatura de horneado sobre la aceptabilidad sensorial. Revista Científica de Ingeniería de la Universidad Nacional de Frontera: Taclla, 2(1), 08-16.

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo andino conocido como mashua (*Tropaeolum tuberosum*) se distribuye geográficamente a lo largo de la cordillera sudamericana, abarcando territorios desde Colombia hasta Argentina. Este tubérculo destaca por su notable rusticidad y óptima productividad, logrando adaptarse eficientemente a terrenos de baja fertilidad y mostrando una inmunidad natural frente a plagas comunes, lo que disminuye la dependencia de agroquímicos, con mayor presencia entre los 3000 y 3700 m s.n.m., donde las temperaturas anuales promedio oscilan entre 8 y 11 °C (Vásquez-Manrique, 2014). Es una especie rústica de alto rendimiento, capaz de desarrollarse en suelos pobres sin requerir fertilizantes, con resistencia natural a nematodos, insectos y diversas plagas, lo que la convierte en un cultivo estratégico para la agricultura andina (Manrique et al., 2013).

La mashua es un tubérculo andino que destaca por su notable resiliencia agronómica y su elevada productividad, ya que puede desarrollarse en suelos de baja fertilidad y con limitada disponibilidad de nutrientes. Además, presenta una resistencia natural frente a diversos patógenos locales, característica que reduce la necesidad de emplear pesticidas sintéticos y favorece una producción más sostenible. Desde el punto de vista nutricional, la mashua posee un perfil nutricional superior al de otros tubérculos tradicionales de la región, como la papa (*Solanum tuberosum*), el olluco (*Ullucus tuberosus*) y la oca (*Oxalis tuberosa*), debido principalmente a su mayor contenido de proteínas (Manrique et al., 2013).

Asimismo, diversas variedades de mashua contienen antocianinas, carotenoides y compuestos fenólicos en concentraciones significativas, lo que la clasifica como una fuente potencial de antioxidantes dietéticos (Rodríguez-Medina, 2007). Cabe destacar que la mashua morada (o negra) multiplica de ocho a diez veces la eficiencia antioxidante registrada en la variedad amarilla (Oliveros, 2008), una particularidad metabólica de gran atractivo para la ingeniería de alimentos orientada al desarrollo de productos saludables.

A nivel nacional la superficie cosechada disminuyó de 6700 ha en el año 2000 a 4841 ha en 2016, aunque el rendimiento se incrementó de 5.29 a 6.84 t/ha en el mismo período (Ministerio de Agricultura y Riego, 2018). Esta paradoja refleja la escasa valorización industrial del cultivo y la ausencia de productos procesados derivados de él que dinamicen su cadena productiva.

El desarrollo de productos de panadería enriquecidos con harinas no convencionales constituye una línea activa de investigación en ingeniería agroindustrial, orientada a diversificar el uso de recursos andinos subutilizados y a incrementar el valor nutricional de la oferta alimentaria (Cauvain & Young, 2009). El queque, por su estructura de masa batida con alto contenido de grasa y huevo, representa una matriz tecnológicamente compatible con la incorporación de harinas alternativas, toda vez que sus requisitos de retención gaseosa son inferiores a los de productos fermentados como el pan. Gonzales et al. (2003) postulan que la sustitución de la harina panificable tradicional en proporciones del 10% o menores no impacta de forma negativa en las características reológicas ni en la calidad organoléptica del producto horneado, abriendo una ventana de oportunidad tecnológica para revalorizar los recursos amiláceos andinos subutilizados.

Con el propósito de modelar interacciones multifactoriales en sistemas alimentarios empleando una cantidad mínima de corridas experimentales, se utiliza el Diseño Compuesto Central Rotable (DCCR). Esta aproximación matemática destaca por su solidez al momento de delimitar con exactitud las condiciones operacionales óptimas de un proceso (Rodríguez & lemma, 2005).

Bajo esta premisa, la presente investigación se planteó como meta analizar la influencia del porcentaje de sustitución con harina de mashua negra y las condiciones térmicas de cocción sobre el agrado sensorial de los queques. Del mismo modo, se buscó establecer las variables óptimas de procesamiento empleando la modelación estadística mediante un diseño compuesto central rotatable acoplado a la MSR.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Recursos agroindustriales e ingredientes de panificación

El recurso agroindustrial principal fue harina de mashua negra, adquirida en el mercado de Trujillo, Perú. Los ingredientes complementarios de la formulación base — harina de trigo (*Triticum aestivum*), manteca vegetal, huevo, azúcar, sal y mejorador de panificación — fueron de grado alimentario y procedencia comercial.

2.2 Diseño experimental

En este esquema se utilizó el diseño compuesto central rotacional, se establecieron como variables independientes la tasa de sustitución de la harina en estudio (X1, %) y el gradiente térmico de cocción (X2, °C), mientras que el nivel de aceptabilidad general (AG) del producto operó como la variable de respuesta. Tomando como referencia criterios de estudios previos (Gracia & Paredes, 2001; ITDG, 2001), se fijaron los rangos operacionales de cada factor, incorporando los respectivos límites axiales ($\alpha = \pm 1.41$), detallados en la Tabla 1.

Tabla 1.

Domínios operacionales y niveles de los factores de estudio seleccionados para la optimización de los queques enriquecidos.

Variable	-1.41	-1	0	+1	+1.41
X1: H. mashua (%)	3.0	5.6	12.0	18.4	21.0
X2: Temperatura de horneado (°C)	100	110	135	160	170

Nota. H. mashua: harina de mashua negra. $\alpha = \pm 1.41$ corresponde a los puntos axiales del DCCR para $k = 2$ factores.

Fuente: elaboración propia.

El diseño generó un total de 11 tratamientos, La matriz experimental codificada y los niveles reales correspondientes están en la Tabla 2.

Tabla 2.

Matriz experimental del DCCR con los niveles reales de las variables.

Tratamiento	X1: Concentración H. mashua (%)	X2: Temperatura (°C)
T1	5.6	110
T2	18.4	110
T3	5.6	160
T4	18.4	160
T5	3.0	135
T6	21.0	135
T7	12.0	100
T8	12.0	170
T9	12.0	135
T10	12.0	135
T11	12.0	135

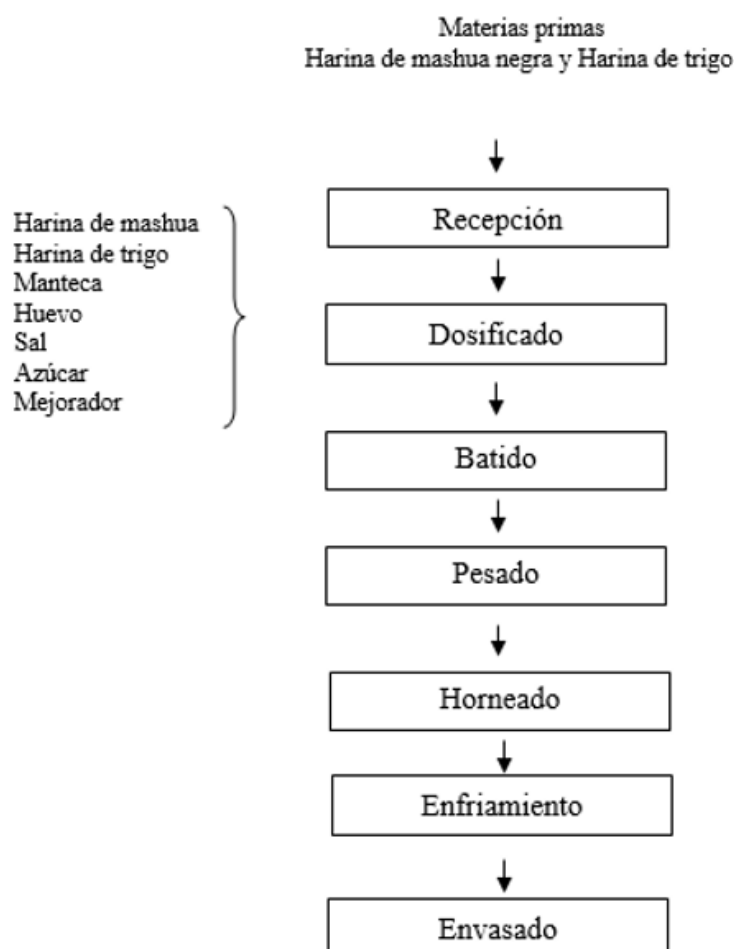
Nota. H. mashua: harina de mashua negra. T9, T10 y T11 corresponden a las repeticiones del punto central. Fuente: elaboración propia.

2.3 Secuencia operativa para la panificación de los queques funcionales.

Con el propósito de asegurar la homogeneidad y reproducibilidad en todas las unidades experimentales, el flujo tecnológico de panificación se estructuró de forma unificada bajo las operaciones secuenciales detalladas a continuación:

Recepción: verificación del estado y aptitud para procesamiento de las harinas y demás ingredientes. Dosificado: pesado de ingredientes según la formulación de cada tratamiento de acuerdo a la Tabla 2. Batido: mezcla de todos los ingredientes hasta obtener una masa homogénea. Pesado: determinación del peso de cada unidad para el control de rendimiento. Horneado: cocción a la temperatura asignada a cada tratamiento (X2) durante 15 minutos para todos los tratamientos. Enfriamiento: a temperatura ambiente. Envasado: en bolsas de polietileno selladas hasta el momento de la evaluación sensorial. Almacenamiento: a temperatura ambiente (20–25 °C) hasta el análisis.

Fig. 1. Secuencia tecnológica de las operaciones unitarias para la manufactura de queques funcionales



2.4 Evaluación de la aceptabilidad general

Las pruebas de aceptabilidad sensorial contaron con el respaldo de un panel de 90 jueces legos pertenecientes al campus

universitario. El juicio crítico de los evaluadores sobre la calidad global del producto se cuantificó empleando una escala visual analógica no estructurada, delimitada por un segmento recto de 10 cm, cuyos extremos estaban anclados con los descriptores "Me desagrada mucho" (0) y "Me gusta mucho" (10), con el punto medio correspondiente a "Indiferente". Las muestras fueron codificadas con números de tres dígitos aleatorios y presentadas de forma monádica secuencial, con un máximo de seis muestras por panelista por sesión. Los valores numéricos se obtuvieron midiendo la posición de la marca del panelista sobre la línea de 10 cm.

2.5 Análisis estadístico

Los datos de aceptabilidad general fueron analizados mediante el software Statistica v7.0 (StatSoft Inc.). Se ajustó un modelo polinómico de segundo orden a los datos experimentales del DCCR, cuya forma general es:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2 \quad (1)$$

donde Y es la aceptabilidad general predicha; X_1 y X_2 son las variables independientes codificadas; β_0 es el coeficiente de intercepción; β_1 y β_2 son los coeficientes lineales; β_{11} y β_{22} son los coeficientes cuadráticos; y β_{12} es el coeficiente de interacción (Rodríguez & lemma, 2005). Con el propósito de delimitar los gradientes de optimización, se estructuraron mapas bidimensionales de contorno junto con gráficos tridimensionales de superficie de respuesta. La fidelidad matemática de dicho ajuste se cuantificó en función de los parámetros estadísticos R^2 y R^2 ajustado, mientras que el impacto real e individual de cada coeficiente del modelo se corroboró mediante la prueba de ANOVA.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Aceptabilidad general de los tratamientos

Los resultados de la aceptabilidad general para los 11 tratamientos del DCCR se presentan en la Tabla 3. Los puntajes variaron entre 3.8 y 9.4, evidenciando una amplia influencia de las variables independientes estudiadas sobre la respuesta sensorial.

Tabla 3.

Matriz de respuestas sensoriales para la aceptabilidad general de los queques enriquecidos con el tubérculo andino según las 11 corridas del diseño experimental.

Tratamiento	Concentración H. mashua (%)	Temperatura (°C)	Aceptabilidad general
T1	5.6	110	6.8
T2	18.4	110	4.7
T3	5.6	160	7.4
T4	18.4	160	7.6
T5	3.0	135	7.7
T6	21.0	135	7.9
T7	12.0	100	3.8
T8	12.0	170	9.4
T9	12.0	135	8.2
T10	12.0	135	8.0
T11	12.0	135	8.4

Nota. H. mashua: harina de mashua negra. Escala hedónica no estructurada de 10 cm (0 = Me desagrada mucho; 10 = Me gusta mucho). Fuente: elaboración propia.

El tratamiento T8 (12 % de harina de mashua negra, 170 °C) obtuvo la mayor aceptabilidad general (9.4/10), mientras que T7 (12 % de harina de mashua negra, 100 °C) registró el puntaje más bajo (3.8/10). Resulta particularmente revelador que ambos tratamientos comparten la misma concentración de harina de mashua negra (12 %), diferenciándose únicamente en la temperatura de horneado, lo que señala a esta última como la variable de mayor influencia sobre la aceptabilidad. Las repeticiones del punto central (T9, T10 y T11) presentaron puntajes de 8.2, 8.0 y 8.4, respectivamente, con una variabilidad reducida (desviación estándar = 0.2), lo que confirma la reproducibilidad del proceso bajo las condiciones centrales del diseño.

Un análisis del tratamiento T7 sugiere que su reducida preferencia organoléptica es consecuencia directa de un fenómeno de cocción inconclusa debido a un gradiente térmico insuficiente. Como describe Koch (1998), los horneados deficientes comprometen la calidad estructural, ocasionando un colapso en la cúpula del producto, encogimiento perimetral, adherencias en la corteza y pérdida de uniformidad textural. Esta hipótesis se refuerza con las observaciones de García-Ruiz (1990), quien vincula la aparición de vetas densas subsuperficiales con tratamientos térmicos truncados. En última instancia, la manifestación visible y táctil de estos defectos deteriora el juicio sensorial global, afectando negativamente la experiencia del evaluador respecto a la apariencia, el sabor y la palatabilidad.

En contraste, el tratamiento T8 desarrolló las características sensoriales propias de un queque bien horneado: textura suave, costra definida y desarrollo adecuado del color y del sabor. No obstante, debe considerarse que temperaturas muy elevadas favorecen la formación de acrilamida mediante la reacción entre la asparagina y los azúcares reductores presentes en los cereales, reacción que ocurre a temperaturas superiores a 120 °C y cuya magnitud depende del binomio tiempo-temperatura (Lineback, 2012). Por esta razón, el control estricto de los parámetros de horneado es indispensable para equilibrar la calidad sensorial con la inocuidad del producto.

Fig. 2. Queques elaborados en cada uno de los 11 tratamientos del DCCR, mostrando diferencias en color, formación de grietas y estructura superficial.



Los aspectos visuales evidenciados en los 11 tratamientos (color, formación de grietas, elevación de la cúpula) son consistentes con los mecanismos de horneado descritos en la literatura. García-Ruiz (1990) El impacto de las temperaturas críticas en la cocción se manifiesta, por un lado, en la deformación geométrica del producto mediante la aparición de un ápice pronunciado y grietas medulares. No obstante, Koch (1998) matiza que este ambiente hipotérmico acelera la transición de fase de las grasas e intensifica la reactividad del agente de levado; este mecanismo conjunto maximiza el rendimiento volumétrico de la pieza y promueve una diferenciación más marcada de la corteza.

3.2 Ajuste del modelo y análisis de varianza

Los resultados del ANOVA para los coeficientes del modelo cuadrático de segundo orden se mencionan en la tabla 4.

Tabla 4.

Resultados del ANOVA para el perfil de aceptabilidad general en matrices de panificación con sustitución de harina de mashua negra (DCCR.).

Fuente de variación	Suma de cuadrado	Grado de libertad	Cuadrado medio	F	p
X1 lineal	0.329	1	0.329	0.435	0.5388
X1 cuadrático	0.664	1	0.664	0.876	0.3923
X2 lineal	16.237	1	16.237	21.431	0.0057
X2 cuadrático	5.078	1	5.078	6.702	0.0489
X1 × X2	1.323	1	1.323	1.746	0.2437
Error	3.788	5	0.758	—	—
Total	26.785	10	—	—	—

Nota. F: estadístico F calculado; p: valor de probabilidad. En negrita se indican los términos estadísticamente significativos ($p < 0.05$). X1: concentración del tubérculo andino; X2: temperatura en el horno. Fuente: elaboración propia.

El análisis de varianza evidenció una selectividad marcada en los factores de estudio: únicamente las variables lineales ($p = 0.0057$) y cuadrática ($p = 0.0489$) de la temperatura de cocción (X_2) resultaron significativas ($p < 0.05$). La respuesta del modelo ante la concentración del polvo de la raíz andina (X_1) y el efecto sinérgico o antagonístico de la interacción ($X_1 \times X_2$) resultó estadísticamente irrelevante ($p > 0.05$). En consecuencia, se deduce que el perfil térmico actúa como el modulador principal de la calidad hedónica en el queque, mientras que la variación de la harina de mashua negra (3–21 %) no altera el umbral de detección sensorial del panel de consumidores habituales. Este fenómeno coincide en parte con los postulados de Gonzales et al. (2003), cuyos ensayos en panificación con un 10 % de sustitución parcial no reflejaron modificaciones de consideración en la estructura ni en la palatabilidad, validando la hipótesis de este trabajo donde concentraciones aún mayores (de hasta 21 %) mantuvieron una respuesta de agrado favorable.

La no significancia de la interacción $X_1 \times X_2$ confirma que ambas variables actúan de manera independiente sobre la respuesta, simplificando la interpretación del modelo. En concordancia con los hallazgos reportados por Sangronis (2004) respecto al impacto crítico del perfil térmico del horno sobre los niveles de agrado en productos de bollería, la presente evaluación ratificó una marcada significancia para la variable independiente descrita por X_2 . En la tabla 5 se muestran los coeficientes matemáticos correspondientes para la preferencia organoléptica de las matrices de panificación.

Tabla 5.

Coefficientes matemáticos correspondientes para la preferencia organoléptica de las matrices de panificación.

Término	Coefficiente	Error estándar	t	p	IC -95 %	IC +95 %
Intercepto (β_0)	-22.583	11.898	-1.898	0.1161	-53.167	8.001
X1 lineal (β_1)	-0.315	0.429	-0.734	0.4960	-1.417	0.788
X1 cuadrático (β_{11})	-0.008	0.009	-0.936	0.3923	-0.032	0.015
X2 lineal (β_2)	+0.430	0.164	2.616	0.0473	0.007	0.852
X2 cuadrático (β_{22})	-0.002	0.001	-2.589	0.0489	-0.003	0.000
$X_1 \times X_2$ (β_{12})	0.004	0.003	1.321	0.2437	-0.003	0.011

Nota. En negrita se indican los coeficientes estadísticamente significativos ($p < 0.05$). X_1 : Harina de mashua negra (%); X_2 : temperatura de horneado (°C). $R^2 = 0.859$; $R^2_{ajustado} = 0.717$. Fuente: elaboración propia.

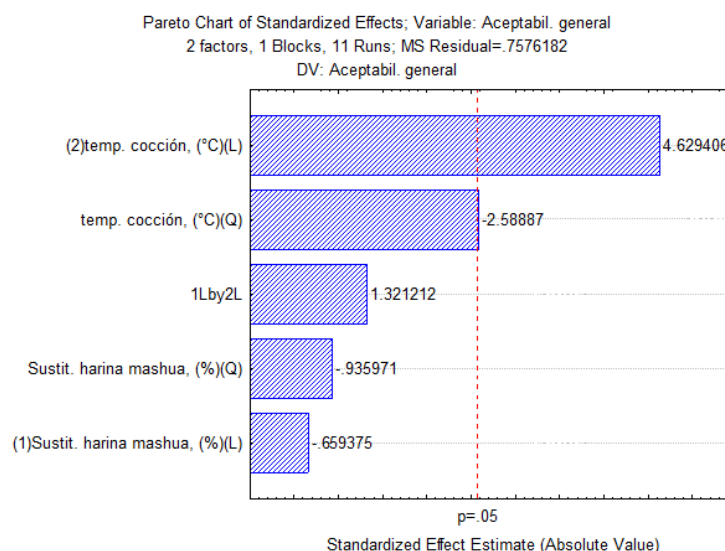
El modelo de predicción de la aceptabilidad general en términos de las variables reales queda expresado como:

$$Y_1 = -22.583 - 0.315 \cdot X_1 - 0.008 \cdot X_1^2 + 0.430 \cdot X_2 - 0.002 \cdot X_2^2 + 0.004 \cdot X_1 X_2$$

Donde el estimador dimensional Y_1 denota la aceptabilidad organoléptica general simulada por el modelo (cuantificada en un rango de 0 a 10); mientras que las variables predictoras del diseño corresponden a la dosificación de harina del tubérculo purpúreo (X_1 , expresada en valor porcentual) y a la intensidad térmica del horneado (X_2 , estipulada en °C).

El coeficiente lineal positivo para X_2 (+0.430) confirma que, dentro del rango evaluado, incrementos en la temperatura de horneado aumentan la aceptabilidad general. El coeficiente cuadrático negativo para X_2 (-0.002) indica la existencia de un punto de máxima respuesta a una temperatura determinada, más allá del cual la aceptabilidad disminuiría, comportamiento consistente con la curvatura observada en la superficie de respuesta. El modelo presentó un coeficiente de determinación $R^2 = 0.859$, indicando que el 85.9 % de la variabilidad en la aceptabilidad general es explicada por el modelo ajustado. El $R^2_{ajustado} = 0.717$ refleja un ajuste adecuado considerando la penalización por el número de parámetros en relación al tamaño experimental (11 tratamientos).

Fig. 3. Representación analítica de Pareto concerniente al peso específico de las variables del polinomio sobre la preferencia general de la matriz de panificación funcional (la demarcación vertical denota el nivel de confianza de $p = 0.05$).



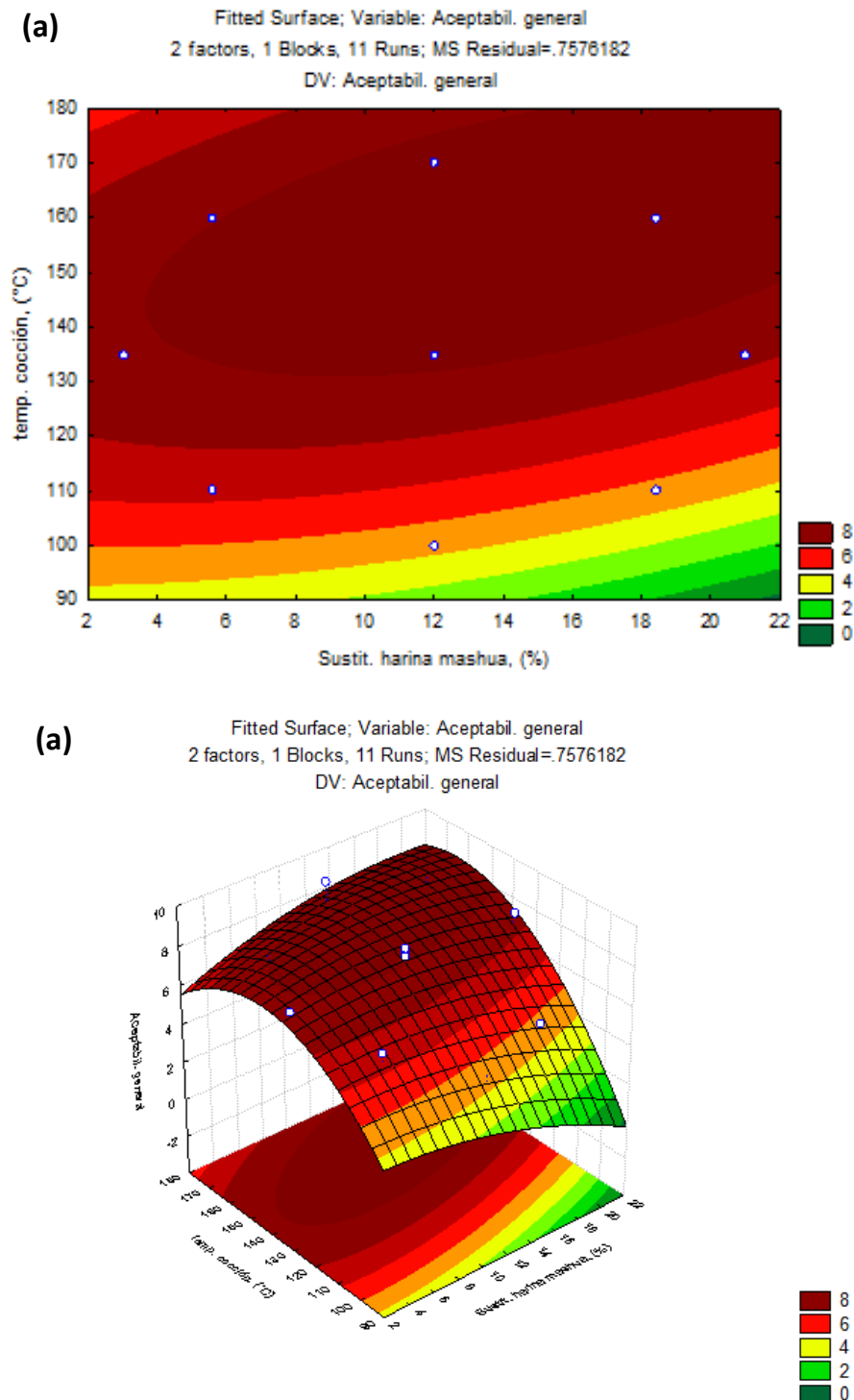
3.3 Superficie de respuesta y condiciones óptimas de proceso

Las superficies de contorno y de respuesta tridimensional generadas a partir del modelo cuadrático ajustado permiten visualizar de manera simultánea el efecto de ambas variables sobre la aceptabilidad general.

Como se observa en la Figura 4 (a), las zonas de mayor aceptabilidad (valores ≥ 8 , representadas en tonos cálidos) se concentran en la región superior del diagrama, correspondiente a temperaturas de horneado de 155–170 °C, independientemente del nivel de concentración de harina de mashua negra. En contraste, la región de menor aceptabilidad (valores ≤ 4 , tonos fríos) corresponde exclusivamente a temperaturas bajas (100–110 °C), independientemente de la harina en objeto de estudio, lo que refuerza la dominancia de la temperatura sobre la respuesta sensorial.

La superficie de respuesta tridimensional (Figura 4b) muestra una curvatura pronunciada en el eje de la temperatura, con un ascenso pronunciado hacia temperaturas elevadas y una estabilización en la zona superior del dominio experimental. Esta forma de "rampa ascendente con inflexión" es característica de una respuesta controlada por un término lineal dominante y un término cuadrático de corrección, tal como lo refleja el modelo obtenido.

Fig. 4. Modelado geométrico de la preferencia general del consumidor en matrices de panificación funcional expuesto en forma de: (a) curvas de nivel y (b) gráficos vectoriales tridimensionales de superficie. Las variables predictoras corresponden a la fracción de sustitución de harina del tubérculo purpúreo (X_1 , %) y la temperatura del tratamiento térmico (X_2 , °C).



Las condiciones óptimas de elaboración identificadas mediante el análisis de superficie de respuesta corresponden a una temperatura de horneado de 155–160 °C y una concentración de la materia prima entre 12–18.5 %, con las cuales se predice una aceptabilidad general superior a 8.0/10. Bajo estas condiciones, el tratamiento T8 (12 %, 170 °C) alcanzó el puntaje máximo experimental de 9.4/10, confirmando la validez predictiva del modelo. Estos resultados son consistentes con lo reportado por Sangronis (2004) respecto a la influencia determinante de la temperatura de horneado sobre la aceptabilidad en panificación, y con los valores de concentración reportados por Gonzales et al. (2003), que indican tolerancia sensorial a sustituciones de harina de trigo en queques en el rango de hasta el 10 %, extendible según los datos del presente estudio hasta niveles de 21 % cuando la temperatura de horneado es adecuada.

Desde la perspectiva nutricional, la incorporación de harina de mashua negra en queques representa un avance hacia formulaciones de mayor valor funcional. Sus compuestos fenólicos y capacidad antioxidante (Rodríguez-Medina, 2007; Oliveros, 2008), junto con su contenido en glucosinolatos e isotiocianatos de reconocida actividad biológica (Manrique et al., 2013), confieren al producto desarrollado atributos funcionales que complementan su aceptabilidad sensorial, posicionándolo como una alternativa viable para el segmento de alimentos saludables con identidad andina.

4. CONCLUSIONES

La temperatura de horneado fue el factor estadísticamente determinante de la aceptabilidad general de los queques elaborados con harina de mashua negra, tanto en su efecto lineal ($p = 0.0057$) como cuadrático ($p = 0.0489$), dentro del rango de 100 a 170 °C evaluado. Tasa de inclusión del polvo de mashua negra (3–21 %) y la interacción entre ambas variables no ejercieron efectos significativos sobre la aceptabilidad general ($p > 0.05$), lo que indica que el porcentaje de sustitución, dentro del rango estudiado, puede ajustarse con relativa flexibilidad sin comprometer la aceptabilidad del consumidor, siempre que la temperatura de horneado sea adecuada. El modelo polinómico de segundo orden ajustado presentó un $R^2 = 0.859$ y $R^2_{ajustado} = 0.717$, con capacidad predictiva adecuada para el rango experimental evaluado. La ecuación del modelo fue: $Y_1 = -22.583 - 0.315 \cdot X_1 - 0.008 \cdot X_1^2 + 0.430 \cdot X_2 - 0.002 \cdot X_2^2 + 0.004 \cdot X_1 \cdot X_2$. Las condiciones óptimas de elaboración de queques con polvo de mashua negra corresponden a una temperatura de horneado de 155 a 160 °C y una sustitución de polvo de mashua negra de 12–18.5 %, con las cuales se obtiene una aceptabilidad general superior a 8.0/10 en escala hedónica de 10 puntos. La incorporación de harina de mashua negra en productos de panadería como el queque constituye una alternativa tecnológicamente viable para agregar valor a este cultivo andino subutilizado, con potencial para contribuir al desarrollo de la industria agroindustrial regional. Se recomienda para estudios futuros evaluar el efecto del tiempo de horneado como variable adicional, caracterizar el perfil nutricional del queque optimizado en función del tratamiento térmico, y estudiar la vida útil del producto bajo diferentes condiciones de almacenamiento.

6. CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores manifiestan no tener intereses en conflicto ni compromisos de índole comercial o financiero que sesguen los criterios analíticos, metodológicos o las conclusiones derivadas del presente estudio.

7. CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

KRG-T y VPN-Z: Redacción: borrador original, Conceptualización, Metodología, Investigación, Redacción: revisión y edición, Análisis formal, Validación.

8. REFERENCIAS

- Cauvain, S., & Young, L. (2009). *Technology of breadmaking* (2.ª ed.). Manole.
- García-Ruiz, J. M. (1990). *Geoecología de las áreas de montaña*. Geoforma Ediciones.
- Gonzales, R., Torres, C., & Quispe, A. (2003). Efecto de la sustitución de harina de trigo en la calidad y aceptabilidad de queques. *Revista de Ciencia e Ingeniería Agroindustrial*, 5(1), 34–41.
- Gracia, L., & Paredes, M. (2001). *Formulación y optimización de productos de panadería con tubérculos andinos*. Instituto de Tecnología de Desarrollo y Gestión (ITDG).
- ITDG. (2001). *Manual de procesamiento de tubérculos andinos para panificación*. Intermediate Technology Development Group, Lima, Perú.
- Koch, R. M. (1998). Principles of baking: Temperature effects on cake structure and quality. *Journal of Cereal Science*, 28(2), 145–156.
- Kader, A. A. (2011). *Tecnología postcosecha de cultivos hortofrutícolas* (3.ª ed.). UCANR Publications.
- Lineback, D. R., Coughlin, J. R., & Stadler, R. H. (2012). Acrylamide in foods: A review of the science and future considerations. *Annual Review of Food Science and Technology*, 3, 15–35. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022811-101114>
- Manrique, I., Valladolid, A., & Blas, R. (2013). *La mashua (Tropaeolum tuberosum): cultivo y usos*. Centro Internacional de la Papa (CIP), Lima, Perú.
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2018). *Estadísticas de producción agrícola: mashua 2000–2017*. MINAGRI, Lima, Perú. <https://www.midagri.gob.pe>
- Oliveros, M. (2008). Capacidad antioxidante de variedades de mashua (*Tropaeolum tuberosum*): comparación entre cultivares morado y amarillo. *Revista de Fitoquímica Andina*, 3(2), 88–97.
- Rodríguez, M., & lemma, A. F. (2005). *Planejamento de experimentos e otimização de processos: uma estratégia sequencial de planejamentos*. Casa do Pão Editora, Campinas, Brasil.

- Rodríguez-Medina, G. C. (2007). Compuestos fenólicos y capacidad antioxidante en tubérculos de mashua (*Tropaeolum tuberosum*). *Revista de Ciencias Agropecuarias Andinas*, 4(1), 22–31.
- Sangronis, E., Machado, C. J., & Cava, R. (2004). Properties of legume flours and their applications in gluten-free bakery products. *Interciencia*, 29(12), 671–676.
- Trivelli, C., & Remy, M. I. (1997). Cultivos andinos y el mercado: el caso del ulluco en la sierra sur del Perú. Centro Internacional de la Papa (CIP), Lima, Perú.
- Vásquez-Manrique, J. F. (2014). Distribución geográfica y ecología de la mashua (*Tropaeolum tuberosum*) en la región andina. *Revista de Geografía Andina*, 7(2), 45–58.