

Diseño de parcelas divididas para el desarrollo de una harina mejorada y funcional de granos germinados de lenteja o arveja

Split-plot design for the development of an improved and functional flour of sprouted lentil or pea grains

Steven García-Goñi^{1*}

¹Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Industrial, Costa Rica

Fecha de recepción: 5 de abril de 2023. Fecha de aceptación: 2 de enero de 2024.

*Autor de correspondencia: steven.garciagoni@ucr.ac.cr

Resumen. Las leguminosas como la lenteja y la arveja tienen un alto valor nutricional, pero con una baja biodisponibilidad debido a la presencia de antinutrientes. La germinación de granos se emplea para mejorar las propiedades nutricionales y reducir la cantidad de taninos y ácido fítico. El objetivo fue desarrollar una harina de granos germinados de lenteja o arveja con características nutricionales mejoradas y funcionales que podría emplearse como alternativa o complemento a la harina de trigo en la elaboración de productos. Se ejecutó un experimento de parcelas divididas y se midió cuatro variables de respuesta para cada tratamiento: diferencia de color (ΔE), peso final (g), rendimiento y textura (cm). Los factores utilizados fueron: la especie del grano, el tiempo de secado, la presencia de secado previo, el estado de los granos (enteros o triturados) y la cantidad de veces que los granos fueron molidos. Los modelos multinivel bayesianos presentaron un bajo coeficiente de correlación intraclase ($<2.69\%$) y los valores de R_c^2 se encontraron entre 62.30% y 89.61%. La función de deseabilidad (deseabilidad compuesta=0.76), determinó que la mejor combinación de niveles para las respuestas combinadas es: utilizar granos de lenteja germinada, con 125 minutos de secado, con secado previo, los granos triturados y cuatro moliendas. Se obtuvo una harina que cumple con las características de ser mejorada y funcional y sus valores nutricionales la clasificaron como fuente de hierro, potasio y fibra y excelente fuente de proteína y calcio.

Palabras clave. Diseño de parcelas divididas, estadística bayesiana, función de deseabilidad, germinación de granos, harina de leguminosas, nutrición.

Abstract. Legumes such as lentils and peas have high nutritional value, but with low bioavailability due to the presence of antinutrients. Sprouting of grains is used to enhance nutritional properties and reduce the amount of tannins and phytic acid. The objective was to develop a flour from sprouted lentil or pea grains with improved and functional nutritional characteristics that could be used as an alternative or complement to wheat flour in the production of products. A split-plot experiment was conducted and four response variables were measured for each treatment: color difference (ΔE), final weight (g), yield, and texture (cm). The factors used were grain species, drying time, presence of pre-drying, grain state (whole or crushed), and number of times grains were milled. Bayesian multilevel models showed a low intraclass correlation coefficient ($<2.69\%$) and R_c^2 values ranged from 62.30% to 89.61%. The desirability function (composite desirability=0.76) determined that the best combination of levels for the combined responses is to use sprouted lentil grains, with 125 minutes of drying, pre-drying, crushed grains, and four milling. A flour was obtained that meets the characteristics of being improved and functional, and its nutritional values classified it as a source of iron, potassium, and fiber and an excellent source of protein and calcium.

Keywords. Split-plot design, bayesian statistics, desirability function, grains sprouting, legume flour, nutrition.

1. Introducción

La desnutrición y la nutrición desequilibrada debido a las malas opciones dietéticas se encuentran entre los principales factores que afectan a patologías como la diabetes, obesidad y la anemia, con un impacto importante en infantes y personas

mayores, en el que más de un tercio de las enfermedades del mundo se atribuyen a la dieta [1], [2].

En este sentido, en la actualidad, los ciudadanos de todo el mundo son cada vez más conscientes de los hábitos

alimenticios y se encuentran más informados, por lo que demandan alimentos que conlleven un beneficio para la salud, lo que genera una alta y creciente prevalencia mundial de estos alimentos [1], [3]. En el caso específico de Costa Rica, el sector de los habitantes que está compuesto por personas que se hacen mayores, así como por personas jóvenes, priorizan la salud y el bienestar a la vez que se interesan en conocer sobre los ingredientes y nutrientes de los alimentos que consumen, y demuestran estar altamente informados [4].

Los principales cambios en la demanda de productos alimenticios son motivados por el crecimiento de la población y las modificaciones en el estilo de vida y otros factores como la pandemia causada por el COVID-19 que han aumentado la demanda de alimentos mejorados y funcionales, lo que es una oportunidad que los fabricantes de alimentos pueden aprovechar para rediseñar su estrategia de marketing relacionada con productos saludables [5], [6].

Algunos estudios han señalado a los ingredientes funcionales como una protección de primera línea para impulsar al sistema inmune en la prevención de enfermedades [5], estos beneficios pueden estar asociados con vitaminas y minerales [1].

En esta línea, los alimentos funcionales son aquellos que proporcionan un beneficio científicamente comprobado para la salud que va más allá de su valor nutricional [7]. Se dicen que los alimentos son mejorados cuando se obtienen mejoras nutricionales de un alimento respecto a sí mismo por la potenciación o inclusión de nutrientes por modificación o métodos directos [8].

El uso de ingredientes naturales provee beneficios asociados con compuestos bioactivos clave, que pueden reducir el riesgo de desarrollar diferentes patologías [7]. A pesar de su alto valor nutricional y del hecho de que han sido parte esencial de la dieta humana durante siglos, el consumo de leguminosas es generalmente subestimado [9], y en el caso particular de la población costarricense se encontró que el consumo diario de leguminosas es menor a la media taza de leguminosas recomendado [10].

Las leguminosas como las lentejas (*Lens culinaris*) y las arvejas (*Pisum sativum*) tienen un valor nutricional alto, con presencia de carbohidratos, proteínas, zinc, hierro, calcio, vitamina B, B₆, B₁₂, C, D, E y omega 3, e incluirlos en la alimentación diaria es una opción beneficiosa tanto para la prevención como para el control de enfermedades crónicas no transmisibles [10], [11].

Sin embargo, las leguminosas tienen una baja biodisponibilidad de nutrientes debido a los compuestos antinutricionales que comúnmente se encuentran en los alimentos vegetales; por ejemplo, el ácido fítico y los taninos forman complejos insolubles con el calcio, zinc, hierro, cobre, los carbohidratos y las proteínas, interfiriendo en su absorción, convirtiéndolos en no asimilables por el organismo [11]–[14].

La germinación puede reducir la cantidad de antinutrientes, por ejemplo, en la lenteja los taninos se reducen de forma significativa ($p < 0.05$) entre 47.86% y 59.40% y el ácido fítico entre 45.85 % y 73.76 %, a los tres y seis días después de la germinación, respectivamente [15]. Otras leguminosas en las que la germinación reduce el contenido de estos antinutrientes son la soja verde (*Phaseolus aureus*), arvejas catjang (*Vigna catjang*) y garbanzo (*Cicer arietinum*) [16]. También puede aumentar la disponibilidad de nutrientes en los granos [17].

Este es un bioproceso que se emplea para mejorar las propiedades nutricionales y bioactivas de los granos de manera natural; esta es inducida por medio de la rehidratación del grano lo que aumenta el contenido y biodisponibilidad de nutrientes y la producción de metabolitos secundarios con propiedades antioxidantes y otras relacionadas con el bienestar y la salud [6], [18], [19].

La desventaja de los granos germinados deviene de que su vida útil es corta y su consumo crudo se puede asociar con enfermedades transmitidas por alimentos, causadas por patógenos, por lo que deben ser lavados, desinfectados o escaldados previo a su consumo [20], [21]; por lo que procesar el grano germinado para aumentar su vida útil y reducir el riesgo de transmisión de enfermedades al convertirlo en una materia prima alimenticia representa un beneficio.

Una forma de aprovechar el potencial de la germinación y el valor nutricional de las leguminosas es desarrollando una harina; ya se comercializan harinas libres de gluten a base de leguminosas, y además, hoy en día muchos fabricantes de alimentos están buscando reemplazar a la harina de trigo por harinas alternativas para ser incluidas en nuevas formulaciones, con alto valor nutritivo y propiedades bioactivas que cumplan con las declaraciones de mejorado y funcional [6].

El objetivo de este estudio consistió en desarrollar una harina de granos germinados de lenteja (*Lens culinaris*) o arveja (*Pisum sativum*) con características nutricionales mejoradas y funcionales que podría emplearse como alternativa o complemento a la harina de trigo en la elaboración de productos.

La estructura de este documento se compone de la revisión bibliográfica, justificación y objetivo de la investigación; seguido de los materiales y métodos que incluye el origen de los granos y el proceso de germinación empleado, así como el diseño experimental que se llevó a cabo, la forma en la que se realizó la medición de las variables de respuesta y el detalle de los métodos estadísticos empleados en el análisis de datos. Posteriormente se presenta la sección de resultados y discusión de los modelos planteados y finalmente el apartado de conclusiones.

2. Materiales y métodos

Este estudio fue desarrollado en la Universidad de Costa Rica, durante el periodo comprendido entre octubre 2018 y agosto 2019, el proceso de germinación, la ejecución del diseño experimental y la medición de las variables de respuesta para la producción de harina se llevaron a cabo en las provincias de San José y Cartago, Costa Rica.

2.1 Origen de los granos

Se utilizaron granos de lenteja y arveja que fueron adquiridos del mercado local costarricense. En Costa Rica la oferta nacional para lenteja y arveja es cubierta por producto importado; para el primero en un 99.4% (compuesto por Canadá: 94.6% y Estados Unidos: 4.8%) y para el segundo en un 93.2% (compuesto por Canadá: 70.6%, Argentina: 17.3% y Perú: 5.3%) [22].

2.2 Proceso de germinación

La germinación de la arveja está en función de la temperatura y para lograr el brote se toma de cuatro a cinco días en condiciones de temperatura de 25°C y en oscuridad, con una tasa de germinación que alcanza el 90% [23]. El tiempo de remojo para la germinación del grano de lenteja es de 12 h y para el crecimiento del brote se requieren de entre tres y cinco días, con un rendimiento de germinación del 92% de los granos, y se potencian, entre otros las proteínas y el hierro [24].

Para el desarrollo de este experimento ambos granos fueron sometidos al mismo proceso de germinación, que consistió en sumergirlos hasta cubrir, con aproximadamente entre dos y tres veces el volumen de granos con agua potable no destilada, y se mantuvieron en remojo durante 12 h. Posteriormente se les removió el agua y estos se colocaron en una germinadora en la cual se humedecieron dos veces al día, cada 12 h, sumergiéndolos en agua potable no destilada por 10 min y luego fueron dispuestos de nueva cuenta en la germinadora.

Este proceso se llevó a cabo en Goicoechea, San José, Costa Rica, con temperatura ambiente, la cual oscilaba entre 17°C y 25°C, y sin presencia de luz natural y/o artificial. En el caso de arveja, tuvo una duración de 48 h, mientras que para la lenteja fue de 36 h, este tiempo fue determinado cuando los brotes alcanzaron una longitud promedio de entre 3 cm y 5 cm de largo.

2.3 Elaboración de la harina

La fase experimental fue ejecutada en las instalaciones de una empresa productora de alimentos ubicada en Tejar, Cartago, Costa Rica.

El secado de ambos granos se realizó a 60°C ya que se sabe que los porcentajes de los nutrientes permanecen en mayor cantidad cuando la temperatura de secado es baja [25], [26]. Este secado se realizó en un único horno eléctrico industrial, giratorio y de convección a velocidad constante, en bandejas de acero inoxidable que fueron colocadas siempre en la misma posición dentro del horno. El proceso de enfriamiento se llevó cabo fuera del horno durante 20 min.

Cada una de las corridas estuvo compuesta por 500 g de producto germinado y una vez fue expuesto al respectivo tratamiento se llevó a cabo la molienda, con un molino que mantuvo una separación de rodillos constante; al finalizar la molienda, el producto se cernió sobre un tamiz de 551 μm , las partículas que no pasaron por el mismo entraron nuevamente al molino. Este proceso se iteró hasta alcanzar las repeticiones necesarias según el tratamiento realizado.

2.4 Mediciones

Se empleó como patrón de comparación a las características de la harina comercial de trigo integral, con el propósito de que mediante la optimización simultánea de las variables de respuesta se obtuviesen valores que se acerquen a esta; ya que se pretendió una harina con características de calidad similares, pero con un mayor valor nutritivo.

Para cada una de las corridas experimentales se midieron cuatro variables de respuesta, cuyo procedimiento de medición se detalla a continuación.

2.4.1 Diferencia de color (ΔE)

Se midió la diferencia de color (ΔE) entre la muestra de cada corrida experimental y un patrón definido por una muestra de harina comercial de trigo integral, que se adquirió en el mercado local ($L^* = 68.20$, $a^* = -3.60$ y $b^* = 5.20$). Para el cálculo se utilizaron las coordenadas CIE-Lab [27] y se obtuvo el valor de ΔE con la ecuación (1) que representó la distribución de la diferencia de color de cada muestra de harina con el patrón establecido.

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

Donde L^* es la luminosidad, a^* son las coordenadas de verde (-) a rojo (+) y b^* son las coordenadas de azul (-) a amarillo (+).

Las fotografías se tomaron en condiciones controladas de iluminación y con ángulo de 90° para cada una de las muestras de harina obtenidas de las corridas experimentales. Los valores de L^* , a^* y b^* fueron medidos mediante el software Photoshop® CS6, con base en el promedio de cinco mediciones, cada una en distintas zonas de la fotografía, con un tamaño de 101 píxeles x 101 píxeles. Un tamaño de muestra de cinco garantizó el cumplimiento del teorema del límite central (TLC) al asumirse una distribución simétrica [28].

2.4.2 Rendimiento

La cuantificación del rendimiento se llevó a cabo mediante el porcentaje que deviene de la razón entre el peso después del secado y antes del cernido y el peso de las partículas que pasaron por el tamiz, mostrada en la ecuación (2).

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Peso después del cernido (g)}}{\text{Peso antes del cernido (g)}} \quad (2)$$

Los respectivos pesos fueron tomados en gramos con una balanza calibrada de resolución de 0.01 g. El cernido se realizó al verter el contenido de harina sobre un tamiz con apertura de $550 \mu\text{m}$ y agitarse por 3 min. Esta apertura determinó la granulometría de la harina, que influyó en la capacidad de hidratación y el tamaño la partícula de polvo que se generó [29], así como en la descripción física de la misma y en características comunes de calidad [30].

Durante décadas la granulometría de la harina integral de trigo osciló entre $630 \mu\text{m}$ y $125 \mu\text{m}$. Estudios señalan que los tamaños de partícula de $500 \mu\text{m}$, $355 \mu\text{m}$ y $150 \mu\text{m}$ presentan mayor cantidad de proteína y menor contenido de almidón [31].

2.4.3 Peso final

La cantidad de harina que se generó luego del cernido fue una variable relevante para la sostenibilidad de la producción y de la cantidad de producto germinado que se necesitó para producir determinada cantidad de harina; ya que, además de la pérdida de peso por la disminución de la humedad que absorbieron estos granos en el proceso de germinación [32] se perdió producto que no cumplió con las especificaciones del diámetro de partícula para pasar por el tamiz. El peso inicial de granos germinados empleado para cada corrida del diseño experimental fue de 500 g. La medición del peso final se

realizó en gramos con una balanza calibrada de resolución de 0.01 g.

2.4.4 Textura

Las pruebas manuales de textura han demostrado alta precisión [33]. En la norma ISO 5492 se definió como textura a los atributos mecánicos, geométricos, de cuerpo y superficie de un producto perceptibles a través de receptores cinestésicos, somáticos, visuales y auditivos; y como atributos mecánicos a aquellos relacionados con la reacción del producto a un esfuerzo, entre estos: dureza, cohesión, viscosidad, elasticidad y adherencia [34].

A partir de una mezcla de una parte de harina y dos partes de agua (10 g/20 g) se evaluó el componente viscoso de la textura; este se definió como un atributo mecánico relacionado con la resistencia a fluir [34]. Para ello se midió la distancia, en centímetros, que recorrió dicha mezcla durante 30 s en un plano inclinado a 45° compuesto por una superficie cerámica lisa. La medición se realizó con una cinta métrica de 0.1 cm de resolución y se comparó con la distancia recorrida por el patrón definido por la harina integral.

2.5 Análisis potencial de nutrientes

Una muestra de 300 g de producto generado por las variables de entrada que fueron determinadas por la función de deseabilidad se envió a análisis químico el 09 de julio del 2019 al Laboratorio Químico Lambda, S.A. ubicado en Cantón Central, San José, Costa Rica, para determinar su valor nutricional. La muestra se analizó el 24 de julio del mismo año.

Para los valores de sodio (Na), potasio (K), calcio (Ca) y hierro (Fe) se emplearon los métodos del laboratorio que fueron acreditados por el Ente Costarricense de Acreditación (ECA); los demás valores reportados, así como los valores de referencia diarios recomendados, fueron obtenidos mediante los métodos publicados en *Methods of Analysis for Nutrition Labeling* por Sullivan y Carpenter [35]. Los redondeos fueron hechos de acuerdo a la normativa centroamericana para etiquetados nutricionales y la FDA del Decreto Ejecutivo No 37295 [36]. Para efectos de trazabilidad el análisis fue codificado y referido por el laboratorio con el Código Lambda: 4209-U00.

2.6 Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental factorial completo 2^5 , jerárquico de parcelas divididas; replicado dos veces. Este fue llevado a cabo con el fin de establecer las condiciones de operación para la producción de harina a partir de granos germinados.

Por costo, tiempo y utilización de recursos en general, no fue posible aleatorizar completamente el orden de las corridas experimentales, lo que decantó en la necesidad de emplear una generalización de los diseños factoriales llamada diseño de parcelas divididas [37]. Los factores especie de los granos (A) y tiempo de secado (B) fueron declarados como difíciles de cambiar (HTC, por sus siglas en inglés), ya que al aleatorizarse resultaría en un uso ineficiente del tiempo; y por estas características este experimento se consideró como pseudoaleatorizado.

Se contó con ocho parcelas completas (PC), conformadas por la replicación de los tratamientos codificados en orden de Yates como (1), a, b y ab, del diseño factorial completo 2^2 de los factores difíciles de cambiar y dentro de cada parcela se encontró anidado un diseño factorial completo 2^3 formado por los factores restantes (figura 1), estas fueron llamadas parcelas divididas (PD) o subparcelas; finalmente se ejecutaron 64 corridas.

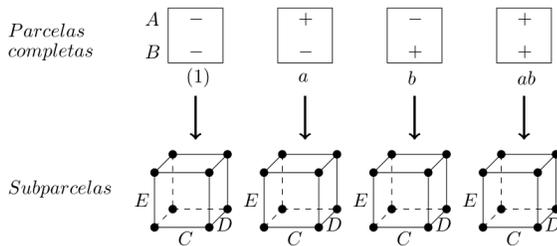


Figura 1. Diseño de parcelas divididas con cinco factores de diseño, dos en la parcela completa y tres en la subparcela.

Los factores y niveles investigados en este experimento (tabla 1) para medir su efecto conjunto sobre las cuatro variables de respuesta, fueron seleccionados con base en hipótesis sobre cómo pueden influir en el comportamiento de dichas respuestas, como el color [38], el tamaño de las partículas de la harina [30] y en características de calidad, como la humedad que permanece [39].

Tabla 1. Factores y niveles del experimento de parcelas divididas

| Codificación | Factor | Nivel bajo (-1) | Nivel alto (+1) |
|--------------|----------------------|-----------------|-----------------|
| A (HTC) | Especie del grano | Lenteja | Arveja |
| B (HTC) | Tiempo de secado | 125 min | 155 min |
| C | Secado previo | Sin secado | Con secado |
| D | Estado de los granos | Enteros | Triturados |

HTC: difícil de cambiar

2.7 Análisis de datos

Los datos obtenidos del diseño experimental fueron analizados mediante una regresión multinivel de dos niveles. Se siguió la estrategia de modelado de arriba-hacia-abajo [40], donde se incluyó el número máximo de efectos fijos, y se tomaron en cuenta todas las interacciones hasta orden cinco, tanto de las variables del segundo nivel, la parcela completa (A y B) como las del primer nivel, la subparcela (C, D y E). En la parte aleatoria del modelo se incluyó el efecto del intercepto para cada una de las ocho parcelas y no se estimaron los efectos de las pendientes aleatorias para las variables de las subparcelas.

Inicialmente se estimaron los 31 efectos fijos y dos efectos aleatorios, de los aleatorios uno fue para el primer nivel, y varió entre los 64 datos de las corridas experimentales y el otro para el segundo nivel que cambió entre las ocho parcelas conformadas.

Estos parámetros fueron estimados mediante estadística bayesiana, en la cual se expresó la incertidumbre sobre los valores de las poblaciones de los parámetros del modelo asignándoles una distribución de valor posible que es llamada previa, porque fue especificada independiente a los datos, esta se combinó con la verosimilitud de los datos para producir la distribución posterior, la cual describió la incertidumbre de los valores de la población y se aproximó mediante simulación Monte Carlo de Cadenas de Markov (MCMC).

Los métodos de estimación bayesianos tienen algunas ventajas sobre los métodos clásicos, como que son válidos en muestras pequeñas y además, no existen supuestos sobre la distribución de los datos [40], [41].

Para la estimación de los parámetros se usaron las previas por defecto del paquete estadístico: una distribución normal débilmente informativa para los efectos fijos y la distribución Wishart inversa para los efectos aleatorios. Ambas distribuciones fueron convenientes, ya que al ser no informativas reflejaron el conocimiento limitado de los parámetros de interés que motivó el diseño del experimento.

2.7.1 Criterios de convergencia

La estimación de los parámetros de todos los modelos planteados se realizó con una cadena de 13,000 iteraciones, de las cuales 3,000 correspondieron al quemado que se eliminaron porque se asumió que esos valores no se encontraban en el estado estacionario. Se aplicaron los criterios de convergencia de la traza, donde para todas las estimaciones se observó el comportamiento esperado de ruido blanco. Por su parte la autocorrelación mostró valores bajos y por ende indicó una convergencia rápida [42].

El diagnóstico de Raftery y Lewis [43] concluyó que el largo de la cadena fue adecuado para estimar el cuantil 0.025 con una precisión de 0.005 con una probabilidad de 0.95. Otros criterios de convergencia utilizados fueron los diagnósticos de Heidelberger y Welch [44] y de Geweke [45]. En todos los modelos y parámetros estimados se alcanzó la convergencia.

2.7.2 Criterio de Información de la Deviancia (DIC)

De cada modelo saturado con todos los parámetros, se prescindió de aquellos parámetros con efectos que son probablemente cero con base en el intervalo de credibilidad (IC) al 95%; este proceso se realizó a la vez que se respetó el principio de jerarquía [37] y se comparó el modelo saturado, el modelo nulo (con solo la pendiente y los efectos aleatorios) y el parsimonioso para cada variable de respuesta y se seleccionó el más probable con base en el criterio de información de la deviancia (DIC, por sus siglas en inglés), el cual indicó que diferencias superiores a cinco son sustanciales y permiten descartar el modelo con el mayor DIC [46], [47].

En todas las variables de respuesta dicho modelo fue el modelo parsimonioso, y este tuvo el menor DIC con una diferencia mayor a cinco en comparación con el modelo nulo y con el modelo saturado. En todos los modelos se estimó la media, la mediana y la moda posterior, así como los respectivos intervalos de credibilidad al 95% de los parámetros estimados. Los valores reportados correspondieron a la media posterior.

2.7.3 Coeficiente de Correlación Intraclase (ICC) y pseudo- R^2

El coeficiente de correlación intraclase describió la similitud u homogeneidad de las repuestas en la variable dependiente dentro del grupo o unidad de análisis al que perteneció [48], en este caso, cada parcela completa, entre más bajo este valor, mayor homogeneidad entre parcelas.

La calidad de los modelos se analizó mediante la media, mediana y moda de la distribución posterior de los pseudo- R^2 para modelos mixtos, donde el R_m^2 (marginal) representó la varianza explicada por los efectos fijos, mientras que el R_c^2 (condicional) se interpretó como la varianza explicada por todo el modelo, incluyendo tanto efectos fijos como aleatorios. En la estimación de los pseudo- R^2 se siguió la metodología propuesta por Shinichi Nakagawa y Holger Schielzeth [49] y se reportó la media posterior.

2.7.4 Función de deseabilidad

Se utilizó la función de deseabilidad como un enfoque para optimizar de manera simultánea las cuatro variables de respuesta; en esencia este procedimiento consiste en traducir las funciones a una escala común ($[0, 1]$) y combinarlas al usar la media geométrica y optimizar la métrica global. Un valor de

deseabilidad igual a uno representa la situación ideal [37], [50], [51].

Para las variables en estudio se buscó disminuir la diferencia de color entre la harina producida con lenteja o arveja germinada y el patrón establecido por la harina de trigo integral para que fuera lo más similar posible en términos de color, ya que las operaciones de secado y la especie del grano pudo afectar la calidad del producto en términos de color [38].

Además, se buscó maximizar el peso final y el rendimiento en términos de granulometría; ambas para aumentar la productividad y la textura medida como el componente viscoso, con el propósito de que fuera lo más cercana posible al mismo patrón de harina integral (34.0cm) utilizado en la evaluación del color. Por lo que las funciones utilizadas fueron de minimización para la primera variable de respuesta y maximización para las restantes.

2.7.5 Procesamiento

La totalidad del análisis fue realizado con el lenguaje de programación R, versión 4.2.2 “*Innocent and Trusting*” [52] en el Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) RStudio versión 2022.7.2.576 “*Spotted Wakerobin*” [53]; se emplearon, además, las librerías $\{MCMCglmm\}$ versión 2.34 [54] y $\{coda\}$ versión 0.19-4 [55] para la estimación de los modelos y la evaluación de los criterios de convergencia, $\{tidyverse\}$ versión 1.3.2 [56] y $\{openxlsx\}$ versión 4.2.5.1 [57] para la carga y procesamiento de datos y $\{desirability\}$ versión 2.1 [58] para la optimización simultánea de las cuatro variables de respuesta.

Los modelos se estimaron sin hallar ningún problema de convergencia, con una duración máxima de dos minutos, que incluyó la optimización de la función de deseabilidad. El conjunto de datos y código utilizados para el análisis multinivel bayesiano llevado a cabo se encuentra en un repositorio de Zenodo [59].

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos del experimento diseñado y la estimación bayesiana multinivel para los efectos fijos utilizando la media posterior se detallan en la tabla 2.

Tabla 2. Media posterior de los efectos fijos estimados por los modelos parsimoniosos para cada variable de respuesta

| Término | Peso (g) | Rendimiento | Dif. de color (ΔE) | Textura (cm) |
|----------------------|----------|-------------|------------------------------|--------------|
| Media general | 183.83 | 0.84 | 17.11 | 15.71 |
| A | 1.17 | 0.02 | 1.71 | 0.82 |
| B | 0.37 | 0.01 | 2.18 | 2.00 |
| C | 0.79 | 0.00 | 0.13 | 0.78 |
| D | 1.35 | 0.03 | 0.39 | 2.39 |
| E | 0.41 | 0.02 | 0.36 | 0.01 |
| AB | 4.00 | 0.00 | 0.15 | 0.58 |
| AC | 0.52 | 0.00 | 0.03 | 0.22 |
| AD | 0.25 | 0.03 | 0.66 | 1.06 |
| AE | 0.39 | 0.01 | 0.11 | 0.04 |
| BC | 0.06 | 0.01 | 0.32 | 0.09 |
| BD | 1.34 | — | 0.31 | 1.10 |
| BE | 3.09 | 0.00 | 0.18 | 0.42 |
| CD | 1.23 | — | 0.24 | 0.48 |
| CE | 0.70 | 0.00 | — | 0.90 |
| DE | 0.98 | — | 0.43 | 0.23 |
| ABC | 0.37 | 0.01 | — | 0.54 |
| ABD | 0.32 | — | 0.13 | 0.23 |
| ABE | 1.24 | 0.01 | 0.19 | 0.25 |
| ACD | 2.34 | — | 0.33 | 0.41 |
| ACE | 1.17 | 0.00 | — | 1.47 |
| ADE | 0.40 | — | 0.59 | 0.86 |
| BCD | 0.09 | — | 0.46 | — |
| BCE | — | 0.01 | — | 0.27 |
| BDE | — | — | 0.28 | 0.65 |
| CDE | 1.55 | — | — | 0.79 |
| ABCD | 1.84 | — | — | — |
| ABCE | — | 0.01 | — | 1.33 |
| ABDE | — | — | 0.62 | 0.81 |
| ACDE | 2.30 | — | — | 0.68 |

Los efectos fijos de los modelos matemáticos fueron útiles para la estimación de las respuestas tanto para el caso de la lenteja como de la arveja, en el tanto se fijó el valor de la especie del grano (A) en bajo (-1) para el primer grano y alto (+1) para el segundo y así se obtuvo el valor de color, peso, rendimiento y textura en función de si se empleó un tipo de grano u otro; no obstante, sin importar los factores se encontró una respuesta media general de 183.83g, 0.84, 17.11 ΔE y 15.71cm respectivamente para el peso, rendimiento, diferencia de color y textura.

Las varianzas del término aleatorio del segundo nivel (σ_{u0}^2) fueron relativamente bajas en comparación a las del primer nivel (σ_e^2) (tabla 3); esto se confirmó con los valores del ICC para la diferencia de color, el rendimiento, el peso y la textura que fueron respectivamente 0.84%, 2.69%, 0.95% y 0.36%. Esto fue indicativo, junto con los valores de pseudo-R² de la tabla 3, principalmente el marginal (R²_m), que la parte fija del modelo fue suficiente para describir el comportamiento de los datos. En conjunto, los valores obtenidos del pseudo-R² condicional (R²_c) fueron considerados aceptables.

Tabla 3. Estimación de los efectos aleatorios de primer y segundo nivel y el pseudo-R² para modelos de efectos mixtos

| Variable | Estadístico | Estimación (IC 95%) |
|----------------------------|-----------------------------|---|
| Diferencia de color | σ_e^2 (PD) | 2.37 (1.45 - 3.48) |
| | σ_{u0}^2 (PC) | 0.02 (0.00 - 0.01) |
| | R ² _m | 82.46 (75.52 - 88.82) |
| | R ² _c | 82.64 (75.72 - 88.91) |
| Rendimiento | σ_e^2 (PD) | 1.84x10 ⁻³ (1.14x10 ⁻³ - 2.63x10 ⁻³) |
| | σ_{u0}^2 (PC) | 5.09x10 ⁻⁵ (1.43x10 ⁻¹⁷ - 2.37x10 ⁻⁴) |
| | R ² _m | 66.99 (55.60 - 77.60) |
| | R ² _c | 67.70 (55.69 - 78.12) |
| Peso | σ_e^2 (PD) | 47.08 (27.64 - 70.61) |
| | σ_{u0}^2 (PC) | 0.45 (0.00 - 0.56) |
| | R ² _m | 60.80 (48.02 - 72.48) |
| | R ² _c | 62.30 (48.52 - 74.97) |
| Textura | σ_e^2 (PD) | 2.79 (1.62 - 4.22) |
| | σ_{u0}^2 (PC) | 0.01 (0.00 - 0.02) |
| | R ² _m | 89.58 (84.73 - 93.67) |
| | R ² _c | 89.61 (84.76 - 93.67) |

PD: parcelas divididas; PC: parcela completa; IC: intervalo de credibilidad; m: marginal; c: condicional

El efecto fijo de los respectivos factores y sus interacciones se estudió de manera conjunta tanto intra como inter modelos, en primera instancia porque la presencia de interacciones de orden tres y superiores dificultan la interpretación y en segundo lugar porque fue requerido encontrar una combinación que propiciara la mejora simultánea de las cuatro variables de respuesta. Los valores de deseabilidad individual y compuesta (tabla 4) indicaron el grado en que se alcanzó el logro de los objetivos de la optimización simultánea.

Los valores que tomaron las variables predictoras de los modelos de regresión fueron -1 y +1, y con ello la mejor combinación posible, que mejoró simultáneamente todas las variables de respuesta fue utilizar granos de lenteja germinados, con 125 min de secado en el horno, con la

presencia de secado previo, con los granos triturados y con cuatro moliendas.

Tabla 4. Deseabilidad y respuesta esperada

| Variable | Respuesta esperada | Deseabilidad |
|-------------------------------|--------------------|--------------|
| Diferencia de color | 17.30 Δ E | 0.71 |
| Rendimiento | 86.99% | 0.72 |
| Peso | 190.66 g | 0.71 |
| Textura | 32.58 cm | 0.92 |
| Deseabilidad compuesta | — | 0.76 |

Se seleccionó a la lenteja como grano ya que además de maximizar la deseabilidad compuesta, presentó valores de deseabilidad individual mejor balanceados para una de las variables de respuesta, lo que quiere decir que sus características se encontraron más cercanas al parámetro de comparación establecido por la harina de trigo integral.

No se evaluó el contenido nutricional de la harina de arveja germinada, pero los modelos estimados se emplearon para determinar la configuración de factores y niveles que mejoraron simultáneamente las variables de respuesta de ésta.

Se fijó el nivel del factor A en alto (+1) para el grano de arveja y se encontró que la mejor combinación posible fue emplear 125 min de secado, con secado previo, con los granos enteros y dos moliendas, con una deseabilidad compuesta de 0.65. Esta configuración no tuvo efectos importantes sobre la deseabilidad individual del peso (0.77) y el rendimiento (0.72), pero sí afectó negativamente a la de la textura (0.30) y positivamente a la de la diferencia de color (1.00).

Aun cuando la deseabilidad individual de la diferencia de color mejoró para la harina de arveja germinada, es decir, que se alcanzó el color deseado; se consideró a esta variable de respuesta como la de menor importancia, ya que se calificó como una variable estética que se puede corregir mediante procesos de blanqueamiento de harina.

La imposibilidad de obtener valores ideales de deseabilidad compuesta e individuales se debió a la diferencia en el comportamiento de las variables de respuesta, por ejemplo, se encontró que la relación entre rendimiento y peso ($r=-0.17$) y textura y peso ($r=-0.08$) es contraria, por lo que, al aumentar una variable, necesariamente disminuye la otra. Por este motivo, mediante la función de deseabilidad, se buscó una solución de compromiso que maximizó el logro de los objetivos de optimización simultánea.

Con la mejor configuración de factores y niveles se produjo la harina que se utilizó en el análisis químico del producto para obtener sus valores nutricionales (tabla 5). Se tomó como base una porción de 100.0g de harina de lenteja germinada de la que

se obtuvieron 380 kcal (1,600 kJ), de las cuales 30 kcal (125 kJ) provinieron de la grasa total.

Tabla 5. Valor nutricional por una porción de 100.0 g de harina de lenteja germinada

| Nutriente | Cantidad | Requerimiento diario |
|------------------------------|----------|----------------------|
| Grasa total | 3 g | 4% |
| Grasa saturada | 1 g | 5% |
| Colesterol | 0 mg | 0% |
| Sodio | 0 mg | 0% |
| Potasio | 900 mg | 19% |
| Carbohidratos totales | 67 g | 24% |
| Fibra dietética | 4 g | 14% |
| Azúcares totales | 31 g | — |
| Proteínas | 25 g | 50% |
| Vitamina C | 0 mg | 0% |
| Calcio | 686 mg | 52% |
| Hierro | 3 mg | 17% |

Se tomó como referencia los valores que se encuentran en el etiquetado nutricional de los granos de lenteja que fueron utilizados para la germinación, se mostró una potencialización de la cantidad de potasio (K) y proteínas, aumentando en 13% y 6% respectivamente. El contenido de sodio (Na) disminuyó a 0.00 % y para el calcio (Ca) el valor de referencia del nutriente (VRN), aumentó en 43%. No obstante, la cantidad de hierro disminuyó en 28% y se perdió 1g de fibra dietética.

Estos resultados justifican la importancia de la germinación como potenciador de las características nutricionales; dado que si se hubiese realizado la harina de lenteja sin germinar bajo la metodología descrita no se habrían obtenido las mejoras en los valores nutricionales reportados.

La pérdida de nutrientes de la harina de lenteja germinada respecto a los granos sin germinar se pudo deber a las operaciones de horneado y cernido; en esta última se generó producto residual que estuvo formado por partículas que contienen la cascarilla y el germen del grano, donde la mayor parte de nutrientes están contenidos [60].

Uno de los hallazgos más relevantes, es que la harina de lenteja germinada se declaró como una excelente fuente de calcio [36] por lo que se comparó este producto con la leche descremada, deslactosada, y de origen vegetal como la soya y la almendra, obtenidas del mercado local, y se encontró que superó el contenido de calcio promedio de estos hasta en 5 veces, por lo que el producto es también una alternativa natural, al no incluir sustancias sintéticas y/o aditivos, para atacar las deficiencias de calcio.

Comparando este producto contra los valores nutricionales promedio de la harina de trigo regular e integral de las principales marcas comercializadas se obtuvo una alternativa altamente nutritiva y libre de gluten para estos productos, conteniendo la harina desarrollada mayor cantidad porcentual por cada 100.0g de nutrientes como el calcio (<47%), proteína (<24%) y potasio (<17%). En el caso del hierro la harina de lenteja germinada supera en 7% a la harina de trigo integral y en 14% a la harina de trigo regular, también es mayor la cantidad de fibra dietética que en la harina de trigo regular en 14%; pero no es el caso con la harina de trigo integral, donde es 28% menor.

En Centroamérica hay una larga tradición con la mezcla de harina de maíz y harina de soya fortificada del Instituto de Nutrición de Centroamérica y Panamá (INCAP) conocida como Incaparina®, que surge debido a la alta incidencia de niños severamente desnutridos en la época de los años 50, ésta fórmula tiene una sólida base de análisis y estudios científicos que respaldan su efectividad como un alimento completo [61].

Respecto a los valores nutricionales de la Incaparina®, la harina de lenteja germinada desarrollada presenta 100% menos sodio, 16% más potasio, 2 g más de fibra dietética, 22 g más de proteína y 32% más de calcio. Pero, por otra parte, presenta 3% menos hierro.

Se hicieron diversas declaraciones del producto, como que fue bajo en grasa y grasa saturada, también fue un producto libre de colesterol y debido a que durante el proceso no se adicionó azúcar o ingredientes que la contengan, se declaró como “sin azúcar agregado”. Además, se clasificó como libre de sodio, excelente fuente de proteína y fuente de fibra, hierro y potasio [36].

Los resultados presentados guardaron concordancia con los realizados en otros estudios, como el de Rico et al. [9]. Por su alto valor nutricional y la abundante presencia de nutrientes como el calcio, la fibra, el hierro y el potasio, es que este producto se señaló como una alternativa a las harinas de trigo comerciales y aquellas sin contenido de gluten, aunque también puede usarse como un complemento de las mismas.

Asimismo, para aquellas personas que han optado por seguir dietas sin derivados animales, este producto puede emplearse como una fuente significativa de proteínas de origen vegetal y otros minerales como el calcio y el hierro.

Al ser fuente de fibra, también colaboraría en las funciones del sistema digestivo, trayendo beneficios como una mejora de la salud bucal, intestinal, reduce los niveles de colesterol y ayuda en la regulación de los niveles de azúcar en sangre, entre otros beneficios para el sistema digestivo [62].

4. Conclusiones

Los valores de ICC y pseudo- R^2 sugieren que el comportamiento entre parcelas completas es homogéneo, por lo que solamente la parte fija del modelo fue suficiente para describir el comportamiento de los datos.

Los modelos matemáticos desarrollados pueden ser empleados para obtener y optimizar los valores de peso, rendimiento, diferencia de color y textura tanto si se emplea lenteja o arveja germinada.

Mediante la función de deseabilidad se obtiene la combinación de factores y niveles que cumplieron con las características de calidad establecidas por el patrón de comparación de harina de trigo integral, para la diferencia de color y textura, a la vez que maximizaron el peso y el rendimiento en términos de granulometría. Es de este modo que los granos de lenteja germinados fueron seleccionados, ya que maximizaron la deseabilidad compuesta.

El proceso de germinación potenció los valores nutricionales del potasio, las proteínas, el sodio y el calcio en el caso específico del grano de lenteja. Se espera que con la germinación la cantidad de antinutrientes en la harina de lenteja germinada disminuya significativamente, aumentando el aprovechamiento de los nutrientes potenciados, no obstante, para demostrar esta aseveración son necesarios estudios de biodisponibilidad y biodigestibilidad, por lo que se recomienda realizarlos en próximas investigaciones.

También se recomienda realizar un análisis químico equivalente para obtener los valores nutricionales de la harina de arveja germinada obtenida con la mejor combinación de factores y niveles que dictó la función de deseabilidad.

La harina de lenteja germinada desarrollada puede ser utilizada como sustituto o complemento a las harinas de trigo, ya que además de su alto valor nutricional, superior a estas harinas, cumple con las expectativas de los consumidores al ser un producto natural con características nutricionales mejoradas y funcionales.

AGRADECIMIENTOS

El diseño experimental del que se obtienen los datos analizados fue realizado como parte del Trabajo Final de Graduación para optar por el título de Licenciatura en Ingeniería Industrial de la Universidad de Costa Rica, por tanto, le agradezco a la Inga. Brenda Fonseca Rodríguez y al Ing. Carlos Campos Argueta, quienes formaron parte de este. Además, a los docentes que estuvieron involucrados durante ese proceso: PhD. Allan Orozco Solano (q.e.p.d.) y PhD. Elba Cubero Castillo por su colaboración y guía; y la Universidad de Costa Rica por hospedar esta investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] S. L. Teoh, S. Ngorsuraches, N. M. Lai, M. Bangpan, y N. Chaiyakunapruk, “Factors affecting consumers’ decisions on the use of nutraceuticals: a systematic review”, *Int. J. Food Sci. Nutr.*, vol. 70, núm. 4, pp. 491–512, may 2019, doi: 10.1080/09637486.2018.1538326.
- [2] I. Barbalova, A. Cherian, y N. Atanasova, “Healthy Living in Latin America: Evolving Consumer and Business Landscape”, *Passpt. Euromonitor*, núm. June, p. 46, 2018.
- [3] P. Prieto-Hontoria, “Innovación y tendencias alimentarias”, *Contrib. Científicas y Tecnológicas*, vol. 41, núm. 141, pp. 15–20, 2016.
- [4] Promotora del Comercio Exterior de Costa Rica, “Retos y oportunidades para la oferta de alimentos diferenciados en Costa Rica”, 2017. [En línea]. Disponible en: [http://servicios.procomer.go.cr/aplicacion/civ/documentos/Estudio Alimentos diferenciados.pdf](http://servicios.procomer.go.cr/aplicacion/civ/documentos/Estudio%20Alimentos%20diferenciados.pdf). [Consultado: 26-nov-2022].
- [5] G. F. Parisi *et al.*, “Nutraceuticals in the Prevention of Viral Infections, including COVID-19, among the Pediatric Population: A Review of the Literature”, *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 22, núm. 5, p. 2465, feb. 2021, doi: 10.3390/ijms22052465.
- [6] D. Rico *et al.*, “Sprouted Barley Flour as a Nutritious and Functional Ingredient”, *Foods*, vol. 9, núm. 3, p. 296, mar. 2020, doi: 10.3390/foods9030296.
- [7] T. Varzakas, G. Zakyntinos, y F. Verpoort, “Plant Food Residues as a Source of Nutraceuticals and Functional Foods”, *Foods*, vol. 5, núm. 4, p. 88, dic. 2016, doi: 10.3390/foods5040088.
- [8] A. Ford y W. Dahl, “Alimentos Funcionales”, *Food Sci. Hum. Nutr. Dep.*, vol. 12, núm. 17, pp. 1–4, 2012.
- [9] D. Rico *et al.*, “Development of Antioxidant and Nutritious Lentil (*Lens culinaris*) Flour Using Controlled Optimized Germination as a Bioprocess”, *Foods*, vol. 10, núm. 12, p. 2924, nov. 2021, doi: 10.3390/foods10122924.
- [10] G. Salas, “Beneficios del consumo de leguminosas en personas con enfermedades crónicas no transmisibles”, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://nutricionparavivirmejor.ucr.ac.cr/index.php/blog/203-beneficios-del-consumo-de-leguminosas-en-personas-con-enfermedades-cronicas-no-transmisibles>.
- [11] M. S. Joehnke *et al.*, “Nutritional and anti-nutritional properties of lentil (*Lens culinaris*) protein isolates prepared by pilot-scale processing”, *Food Chem. X*, vol. 9, p. 100112, mar. 2021, doi: 10.1016/j.fochx.2020.100112.
- [12] B. Martínez, M. V. Ibáñez, y F. Rincón, “Acido fítico: aspectos nutricionales e implicaciones analíticas”, *Arch. Latinoam. Nutr.*, vol. 52, núm. 3, pp. 219–231, 2002.
- [13] R. S. Pal *et al.*, “Effect of dehulling, germination and cooking on nutrients, anti-nutrients, fatty acid composition and antioxidant properties in lentil (*Lens culinaris*)”, *J. Food Sci. Technol.*, vol. 54, núm. 4, pp. 909–920, mar. 2017, doi: 10.1007/s13197-016-2351-4.
- [14] C. Ruiz, C. Díaz, J. Anaya, y R. Rojas, “Análisis proximal, antinutrientes, perfil de ácidos grasos y de aminoácidos de semillas y tortas de 2 especies de Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* y *Plukenetia huayllabambana*)”, *Rev. la Soc. Química del Perú*, vol. 79, núm. 1, pp. 29–36, 2013.
- [15] A. A. Fouad y F. M. A. Rehab, “Effect of germination time on proximate analysis, bioactive compounds and antioxidant activity of lentil (*Lens culinaris* Medik.) sprouts”, *Acta Sci. Pol. Technol. Aliment.*, vol. 14, núm. 3, pp. 233–246, sep. 2015, doi: 10.17306/J.AFS.2015.3.25.
- [16] R. A. Ghavidel y J. Prakash, “The impact of germination and dehulling on nutrients, antinutrients, in vitro iron and calcium bioavailability and in vitro starch and protein digestibility of some legume seeds”, *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 40, núm. 7, pp. 1292–1299, sep. 2007, doi: 10.1016/j.lwt.2006.08.002.
- [17] D. Chaparro, R. Y. Pismag, y A. de D. Elizalde C., “Efecto de la germinación sobre el contenido de hierro y calcio en amaranto, quinua, guandul y soya”, *Biotechnol. en el Sect. Agropecu. y Agroindustrial*, vol. 9, núm. 1, pp. 51–59, 2011.
- [18] N. Aparicio-García, C. Martínez-Villaluenga, J. Frias, y E. Peñas, “Sprouted oat as a potential gluten-free ingredient with enhanced nutritional and bioactive properties”, *Food Chem.*, vol. 338, p. 127972, feb. 2021, doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127972.
- [19] G. L. Bohoua y C. K. K. Yelakan, “Effect of Phytase on the Growth Performances of Growth of Laying Hens (Warren)”, *Int. J. Poult. Sci.*, vol. 6, núm. 5, pp. 383–385, abr. 2007, doi: 10.3923/ijps.2007.383.385.
- [20] D. C. Chaparro, Y. P. Pismag, A. de D. Elizalde, y C. A. Erazo, “Estrategia ARPCC en la producción de semillas germinadas”, *Biotechnol. en el Sect. Agropecu. y Agroindustrial*, vol. 7, pp. 36–44, 2009.
- [21] C. Ponce de León, E. Torija, M. C. Matallana, y C. Pintado, “Interés de los germinados y su Seguridad Alimentaria”, *Nutr. Clin. y Diet. Hosp.*, vol. 40, núm. 1, pp. 62–73, 2020, doi: 10.12873/401ponce.
- [22] Ministerio de Comercio Exterior, “Hortalizas y verduras [Documento preliminar]”, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.comex.go.cr/media/9488/18-hortalizas-y-verduras.pdf>.
- [23] C. Martínez-Villaluenga, P. Gulewicz, J. Frias, K. Gulewicz, y C. Vidal-Valverde, “Assessment of protein fractions of three cultivars of *Pisum sativum* L.: effect of germination”, *Eur. Food Res. Technol.*, vol. 226, núm. 6, pp. 1465–1478, abr. 2008, doi: 10.1007/s00217-007-0678-9.
- [24] X. Andrade Lee, “Método para la obtención de germinados de haba y lenteja (*Vicia faba* L y *Lens esculenta*)”, *Universidad Nacional de Colombia*. pp. 1–7, 2005.

- [25] L. Gil, J. Umaña, J. Pinillos, S. Lopera, y C. Gallardo, “Evaluación del contenido de riboflavina por método de cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) en harinas de lenteja (*Lens esculenta*) germinada y sin germinar”, *Rev. la Asoc. Colomb. Cienc. y Tecnol. Aliment.*, vol. 22, núm. 32, p. 203, 2014.
- [26] L. N. Plúas Ramírez y E. C. Valdiviezo Jiménez, “Comparación de la caracterización nutricional de las harinas de arveja fresca, escaldada y germinada”, Repositorio Institucional de la Universidad de Guayaquil, 2017.
- [27] J. C. Sanz y R. Gallego, *Diccionario del color*. Madrid: Via Gráfica, S.L., 2001.
- [28] C. Tobón y J. Bedoya, “Influencia de la asimetría en el tamaño de la muestra para el cumplimiento del teorema central del límite en distribuciones continuas”, *Sci. Tech.*, vol. 22, núm. 4, pp. 398–402, 2017, doi: 10.22517/23447214.9325.
- [29] B. Berton, J. Scher, F. Villieras, y J. Hardy, “Measurement of hydration capacity of wheat flour: influence of composition and physical characteristics”, *Powder Technol.*, vol. 128, núm. 2–3, pp. 326–331, dic. 2002, doi: 10.1016/S0032-5910(02)00168-7.
- [30] M. J. Cazares Torres, “Evaluación físico-química y farinográfica de la harina de trigo (*Triticum aestivum*) obtenida en los pasajes de la molienda de la industria ‘Molino Miraflores’”, Trabajo de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniera en Alimentos, 2011.
- [31] L. Pérez Lavalle, “Evaluación de las fracciones granulométricas de la harina de sorgo (*sorghum bicolor* (L.) Moench) para la elaboración de una pasta alimenticia”, Universidad Nacional de Colombia, 2010.
- [32] A. Pérez y S. Zapata, “Evaluación del comportamiento comercial de los germinados y brotes tiernos en la ciudad de Medellín: posibles alternativas de comercialización”, Trabajo de grado para optar por el título de Especialista en Gerencia Agropecuaria, 2015.
- [33] E. Castro Montero y R. de Hombre Morgado, *Parámetros mecánicos y textura de los alimentos*. Universidad de Chile, 2007.
- [34] International Organization for Standardization, “Sensory analysis—Vocabulary (Standard ISO No. 5492:2008)”. 2008.
- [35] D. M. Sullivan y D. E. Carpenter, *Methods of analysis for nutrition labeling*. AOAC International, 1993.
- [36] Presidencia de la República, Ministerio de Comercio Exterior, I. y C. Ministerio de Economía, y Ministerio de Salud, *Decreto Ejecutivo 37295. Resolución N°281-2012 (COMIECO-LXII) de fecha 14 de mayo de 2012, modificaciones al Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 67.01.60:10 “Etiquetado Nutricional de Productos Alimenticios Preenvasados para Consumo Humano para poblac.* Costa Rica, Costa Rica: La Gaceta, 2012.
- [37] D. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, 9th ed. Arizona: John Wiley & Sons, Inc., 2017.
- [38] S. Dussán-Sarria, D. L. Hurtado-Hurtado, y J. H. Camacho-Tamayo, “Granulometría, Propiedades Funcionales y Propiedades de Color de las Harinas de Quinua y Chontaduro”, *Inf. tecnológica*, vol. 30, núm. 5, pp. 3–10, oct. 2019, doi: 10.4067/S0718-07642019000500003.
- [39] A. Cerón, A. Hurtado, O. Osorio, y M. Buchely, “Estudio de la formulación de la harina de papa de la variedad parda pastusa (*solanum tuberosum*) como sustituto parcial de la harina de trigo en panadería”, *Biotechnol. en el Sect. Agropecu. y Agroindustrial*, vol. 9, núm. 1, pp. 115–121, 2011.
- [40] J. Hox, M. Moerbeek, y R. van de Schoot, *Multilevel Analysis*, 2nd ed., vol. 5, núm. 3. Routledge, 2010.
- [41] A. Gelman y D. B. Rubin, “Inference from Iterative Simulation Using Multiple Sequences”, *Stat. Sci.*, vol. 7, núm. 4, pp. 457–472, nov. 1992, doi: 10.1214/ss/1177011136.
- [42] C. D. Correal Álvarez, “Métodos para la selección de distribuciones a priori utilizando el estimador de James-Stein, planes de muestreo por atributos y modelos multinivel”, Universidad Nacional de Colombia, 2020.
- [43] A. E. Raftery y S. M. Lewis, “[Practical Markov Chain Monte Carlo]: Comment: One Long Run with Diagnostics: Implementation Strategies for Markov Chain Monte Carlo”, *Stat. Sci.*, vol. 7, núm. 4, nov. 1992, doi: 10.1214/ss/1177011143.
- [44] P. Heidelberger y P. D. Welch, “A spectral method for confidence interval generation and run length control in simulations”, *Commun. ACM*, vol. 24, núm. 4, pp. 233–245, abr. 1981, doi: 10.1145/358598.358630.
- [45] J. F. Geweke, “Evaluating the accuracy of sampling-based approaches to the calculation of posterior moments”, *Fed. Reserv. Bank Minneap.*, 1991, doi: 10.21034/sr.148.
- [46] R. Meyer, “Deviance Information Criterion”, en *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*, Wiley, 2016, pp. 1–6.
- [47] D. J. Spiegelhalter, N. G. Best, B. P. Carlin, y A. van der Linde, “Bayesian measures of model complexity and fit”, *J. R. Stat. Soc. Ser. B (Statistical Methodol.)*, vol. 64, núm. 4, pp. 583–639, oct. 2002, doi: 10.1111/1467-9868.00353.
- [48] B. T. West, K. B. Welch, y A. T. Galecki, *Linear Mixed Models*, 2nd ed. Chapman and Hall/CRC, 2014.
- [49] S. Nakagawa y H. Schielzeth, “A general and simple method for obtaining R² from generalized linear mixed-effects models”, *Methods Ecol. Evol.*, vol. 4, núm. 2, pp. 133–142, feb. 2013, doi: 10.1111/j.2041-210x.2012.00261.x.
- [50] R. Myers, D. Montgomery, y C. Anderson-Cook, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, 3rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [51] G. Derringer y R. Suich, “Simultaneous Optimization of Several Response Variables”, *J. Qual. Technol.*, vol. 12, núm. 4, pp. 214–219, oct. 1980, doi: 10.1080/00224065.1980.11980968.
- [52] R Core Team, “R: A Language and Environment for Statistical Computing”. Vienna, Austria, 2022.

- [53] Posit Team, “RStudio: Integrated Development Environment for R”. Boston, MA, 2022.
- [54] J. D. Hadfield, “MCMC Methods for Multi-Response Generalized Linear Mixed Models: The MCMCglmm R Package”, *J. Stat. Softw.*, vol. 33, núm. 2, pp. 1–22, 2010, doi: 10.18637/jss.v033.i02.
- [55] M. Plummer, N. Best, K. Cowles, y K. Vines, “CODA: Convergence Diagnosis and Output Analysis for MCMC”, *R News*, vol. 6, núm. 1, pp. 7–11, 2006.
- [56] H. Wickham *et al.*, “Welcome to the Tidyverse”, *J. Open Source Softw.*, vol. 4, núm. 43, p. 1686, nov. 2019, doi: 10.21105/joss.01686.
- [57] P. Schauburger y A. Walker, “openxlsx: Read, Write and Edit xlsx Files”. 2022.
- [58] M. Kuhn, “desirability: Function Optimization and Ranking via Desirability Functions”. 2016.
- [59] S. García-Goñi, “Análisis multinivel bayesiano de experimento de parcelas divididas”. Zenodo, 2023, doi: 10.5281/zenodo.7627207.
- [60] H. A. Schroeder, “Losses of vitamins and trace minerals resulting from processing and preservation of foods”, *Am. J. Clin. Nutr.*, vol. 24, núm. 5, pp. 562–573, may 1971, doi: 10.1093/ajcn/24.5.562.
- [61] Incaparina, “Incaparina”. [En línea]. Disponible en: <https://www.incaparina.com/incaparina.php>.
- [62] E. Escudero y P. González, “La fibra dietética”, *Nutr. Hosp.*, vol. 21, núm. SUPPL. 2, pp. 1–30, 2006, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.