

Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Optimización de los parámetros del proceso de explotado de sorgo
mediante superficie de respuesta.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería de Calidad y Productividad

Presenta

Ing. Gloria Gisel Vázquez Sosa

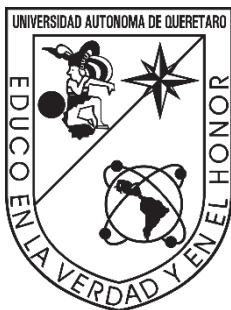
Dirigida por:

Dra. Marcela Gaytán Martínez

Co-dirigido por:

M.T.A. Ángel Humberto Cabrera Ramírez

Querétaro, Qro. Noviembre de 2022



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

Optimización de los parámetros del proceso de explotado de sorgo mediante superficie de
respuesta.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería de Calidad y Productividad

Presenta

Ing. Gloria Gisel Vázquez Sosa

Dirigida por:

Dra. Marcela Gaytán Martínez

Co-dirigido por:

M.T.A. Ángel Humberto Cabrera Ramírez

Dra. Marcela Gaytán Martínez

Presidente

M.T.A. Ángel Humberto Cabrera Ramírez

Secretario

M. C. Javier García Pérez

Vocal

Dr. Eduardo Morales Sánchez

Suplente

Dr. Eric Leonardo Huerta Manzanilla

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Fecha de aprobación por el Consejo Universitario. 25 de Noviembre de 2022

México

Dedicatorias

Con mucho cariño para las personas que me apoyaron, motivaron e hicieron posible el logro de esta meta.

Agradecimientos

En primera instancia, agradezco a mis directores de tesis que me guiaron en el proceso a lo largo de mi formación académica: la Dra. Marcela Gaytán Martínez y el M.T.A. Ángel Humberto Cabrera Ramírez por el apoyo, sugerencias, aporte de conocimientos, observaciones, y por dedicar tiempo a guiarme a lo largo del proyecto. Gracias por permitirme formar parte su equipo de trabajo.

A mi familia y amigos por acompañarme durante este proceso.

Al Dr. Eduardo Morales Sánchez y al Centro de Investigación en Ciencias Aplicadas y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional (CICATA) unidad Querétaro, por permitirme realizar mi trabajo experimental en sus instalaciones.

A la Universidad Autónoma de Querétaro por permitirme ser parte de ella y estudiar mi maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para la realización de mis estudios de posgrado.

Índice

Resumen	1
Abstract.....	2
I. Introducción	3
1.1 Planteamiento del problema y justificación	5
II. Antecedentes	8
2.1 El sorgo	8
2.1.1 Principales partes del grano de sorgo.....	9
2.1.2 Principales usos y aplicaciones alimenticias del sorgo	10
2.2 Proceso de explotado	11
2.2.1 Explotado mediante aire caliente	13
2.2.2 Lecho fluidizado.....	15
2.2.3 Microondas.....	15
2.2.4 Método de tierra caliente.....	17
2.2.5 Método de sartén con aceite	18
2.3 Caracterización del producto final	20
2.3.1 Propiedades volumétricas y de rendimiento.....	20
2.3.2 Microestructura	20
2.3.3 Análisis de perfil de textura	21
2.4 Optimización de procesos	21
2.4.1 Diseños factoriales	21
2.4.2 Diseño factorial 3 ^k	22
2.4.3 Metodología de superficie de respuesta	22
2.4.4 Diseños de superficie de respuesta.....	23

2.4.5 Diseño central compuesto	25
2.4.6 Diseño Box-Benhken	26
2.4.7 Método de la función de deseabilidad.....	28
III. Hipótesis	29
IV. Objetivos	29
4.1 Objetivo general	29
4.2 Objetivos específicos.....	29
V. Materiales y métodos.....	29
5.1 Aparatos y utensilios de laboratorio	29
5.2 Material biológico.....	30
5.3 Pretratamiento de sorgo	31
5.4 Proceso de explotado	32
5.4.1 Microondas.....	32
5.4.2 Sartén caliente con aceite	33
5.4.3 Sal caliente	33
5.5 Caracterización del explotado.....	34
5.5.1 Determinación de volumen	34
5.5.2 Índice de expansión.....	34
5.5.3 Desempeño de explotado	34
5.5.4 Rendimiento del proceso.....	35
5.6 Microestructura.....	35
5.7 Análisis de Perfil de Textura	35
5.8 Optimización del proceso	36
5.8.1 Diseño Central Compuesto.....	36
5.8.2 Deseabilidad del proceso.....	37

VI. Resultados y discusión	37
6.1 Caracterización del explotado.....	37
6.1.1 Índice de expansión.....	37
6.1.2 Volumen.....	39
6.1.3 Desempeño de explotado	40
6.1.4 Rendimiento del proceso.....	41
6.1.5 Microestructura de explotados de sorgo.....	42
6.1.6 Análisis de perfil de textura	44
6.2 Optimización del proceso	46
6.2.1 Diseño factorial 3^k	47
6.3.2 Diseño central compuesto	55
7. Conclusiones	66
Referencias	68

Índice de cuadros

Cuadro 1. Nomenclatura de los tratamientos para explotado.....	32
Cuadro 2. Análisis de perfil de textura.....	45
Cuadro 3. Niveles de las variables para el diseño factorial 3^k	47
Cuadro 4. Diseño factorial 3^k	48
Cuadro 5. Análisis de varianza para el diseño factorial 3^k del índice de expansión	50
Cuadro 6. Coeficientes de las variables independientes para índice de expansión.....	50
Cuadro 7. Análisis de varianza para el diseño factorial 3^k del índice de expansión	50
Cuadro 8. Coeficientes de las variables independientes para índice de expansión.....	51
Cuadro 9. Residuos	51
Cuadro 10. Resumen del modelo para el análisis de varianza del índice de expansión.....	52
Cuadro 11. Análisis de varianza para el diseño factorial 3^k del rendimiento del proceso ..	53
Cuadro 12. Coeficientes de las variables independientes para rendimiento del proceso	53
Cuadro 13. Residuos	54
Cuadro 14. Resumen del análisis de varianza para el diseño factorial 3^k del rendimiento del proceso.....	54
Cuadro 15. Niveles de exploración en unidades originales	55
Cuadro 16. Diseño central compuesto en unidades codificadas y originales.....	56
Cuadro 17. Estimaciones de los parámetros.....	56
Cuadro 18. Análisis de varianza del DCC para índice de expansión	57
Cuadro 19. Resumen del ajuste para índice de expansión	58
Cuadro 20. Estimaciones de los parámetros para el rendimiento del proceso	58
Cuadro 21. Análisis de varianza del DCC para el rendimiento del proceso	59
Cuadro 22. Resumen del ajuste	59
Cuadro 23. Índice de explotado y rendimiento del proceso de los explotados de sorgo optimizados.....	64

Índice de Figuras

Figura 1. Planta de sorgo.....	8
Figura 2. Componentes anatómicos del grano de sorgo.....	10
Figura 3. Métodos usados en el explotado de granos.....	13
Figura 4. Equipo para explotado de granos mediante aire caliente.....	14
Figura 5. Partes del horno de microondas.....	16
Figura 6. Método tradicional de explotado utilizando tierra caliente.....	18
Figura 7. Método tradicional de explotado usando sartén.....	19
Figura 8. Diseño central compuesto.....	25
Figura 9. Diseño Box-Benhken.....	27
Figura 10. Diagrama de flujo del proyecto.....	31
Figura 11. Curva característica de un análisis de perfil de textura y cálculo de parámetros texturales.....	36
Figura 12. Índice de expansión (adimensional).....	38
Figura 13. Efecto del método y condiciones de procesamiento en el volumen (cm ³) de explotados de sorgo.....	39
Figura 14. Efecto del método y condiciones de procesamiento en el desempeño de explotado (%) de sorgo.....	41
Figura 15. Efecto del método y condiciones de procesamiento en el rendimiento de proceso (%) de explotados de sorgo.....	42
Figura 16. Microestructura de explotados de sorgo obtenidos mediante los diferentes métodos.....	43
Figura 17. Caracterización de explotados.....	49
Figura 18. Ajuste de los datos al modelo de superficie de respuesta para el índice de expansión.....	57
Figura 19. Ajuste de los datos al modelo de superficie de respuesta para el rendimiento del proceso.....	60
Figura 20. Superficie de respuesta para índice de expansión.....	61
Figura 21. Superficie de respuesta para rendimiento del proceso.....	62
Figura 22. Perfilador de predicción para las variables independientes del explotado de sorgo usando sal.....	63

Resumen

El sorgo es el quinto cultivo más cosechado en el mundo. Por sus beneficios nutrimentales, es utilizado para consumo humano y animal. Una de sus aplicaciones es en forma de explotados, sin embargo, es poco aprovechado debido a la baja popularidad del producto. En el proceso de explotado, es importante conocer las condiciones bajo las cuales se obtiene el mejor producto. Lo cual se puede lograr con un proceso de optimización. El presente proyecto tuvo como objetivo determinar mediante superficie de respuesta las condiciones que permitan obtener el mayor índice de explotado del sorgo. El proyecto se dividió en dos fases: la primera corresponde a la selección del método de explotado y la segunda corresponde a la optimización del proceso. La primera etapa consistió en explotar granos de sorgo blanco variedad "Paloma" mediante tres métodos: microondas, sartén con aceite y sal caliente, cada uno con tres niveles. Se determinaron las características volumétricas y de rendimiento para el producto final, su microestructura y perfil de textura. Se seleccionó el método de sal caliente para llevar a cabo el proceso de optimización gracias al destacado volumen del producto final ($10.12 \pm 0.86 \text{ g/cm}^3$). Como primer paso de la segunda etapa, se diseñó un factorial 3^k , para comprobar la presencia de efectos cuadráticos en el modelo. Posteriormente, se utilizó un diseño central compuesto para la optimización. Las variables dependientes evaluadas en ambos modelos fueron el índice de expansión y rendimiento del proceso. Los resultados mostraron que el efecto cuadrático fue significativo entre los componentes del modelo ($R^2 = 0.96$). Los valores que brindaban las respuestas óptimas fueron humedad del grano (15 %) y temperatura del proceso (298 °C), mismos que dieron el mayor índice de expansión (5.29 ± 0.40) y rendimiento del proceso (65.42 ± 3.70). Se obtuvo la ecuación de respuesta para predecir el comportamiento del índice de expansión y rendimiento del proceso de explotado de sorgo.

Palabras clave: *Sorghum bicolor* spp, explotados de sorgo, optimización, diseño central compuesto

Abstract

Sorghum is the fifth most harvested crop in the world. Due to its nutritional benefits, it is used for human and animal consumption, being popped sorghum as a primary product. However, it is not commonly used due to the low popularity of the product. During the popping process, it is crucial to know the conditions that bring the best product attributes. Those conditions can be achieved with an optimization process. The objective of this project was to determine, by response surface methodology, the popping conditions that allow generating the best expansion index of popped sorghum. The project was divided into two phases: the first one corresponds to the selection of the popping process, and the second one to the process optimization. The first stage consisted of popping kernels of white sorghum variety "Paloma" using three processing methods: microwave, hot pan frying and hot salt frying, with three levels for each. The volumetric and performance characteristics for the final product, its microstructure, and its texture profile were defined. The hot-salt frying method was selected for the optimization process due to its outstanding final product volume ($10.12 \pm 0.86 \text{ g/cm}^3$). As the first step for the second stage, a 3^k design was used to check the presence of quadratic effects in the model. Later, it was used a central composite design for the optimization. The dependent variables evaluated in both models were the expansion index and process yield. Results showed that the quadratic effect was significant between the components of the model ($R^2 = 0.96$). The values which produced optimal responses were: 15% of grain moisture and 288 °C for process temperature, which gave the highest expansion index (5.29 ± 0.40) and process yield (65.42 ± 3.70). Answer equation was obtained to predict the behavior of the expansion index and popping process performance.

Keywords: sorghum bicolor spp, popped sorghum, optimization, central composite design.

I. Introducción

El mercado demanda comida fácil de consumir con características nutricionales, sabor agradable y asequibles, como las botanas. Hoy en día, la botana más popular en el mundo son las palomitas de maíz, gracias a las ventajas que ofrece en comparación con otras botanas; algunas de estas ventajas incluyen alto contenido en fibra, antioxidantes, minerales y bajo aporte calórico (Clayton et al. 2019; Momanyi, Owino, y Makokha 2020; Vázquez-Carrillo, Santiago-Ramos, y Figueroa-Cárdenas 2019).

En la India, los explotados de sorgo son el equivalente a las palomitas de maíz, siendo altamente aceptadas (Chávez et al. 2018; Mishra et al. 2014; Sharma, Champawat, y Mudgal 2014). El sorgo (*Sorghum bicolor L. Moench*) es el quinto cultivo más cosechado en el mundo. Este grano es rico en proteínas, carbohidratos complejos y grasa. Al ser cosechado, el sorgo presenta ciertas ventajas agronómicas, tales como eficiente uso del agua, resistencia a la sequía y bajo requerimiento de fertilización del suelo. El sorgo ayuda a combatir problemas de seguridad alimentaria, por lo que es utilizado para consumo humano, animal y como materia prima para generar otros productos alimenticios (Aruna et al. 2020; Sharanagat et al. 2019). México es el sexto país productor de sorgo; sin embargo, su principal uso es como forraje (SIAP 2020). El sorgo es libre de gluten, lo cual lo convierte en una alternativa para las personas que padecen celiaca o alergia al trigo (Llopart y Drago 2016; Vázquez-Araújo, Chambers Iv, y Cherdchu 2012); este cereal también contiene vitaminas, minerales y compuestos antioxidantes (FIRA y Agricultura 2019). Inclusive, no se absorbe parte del azúcar en el cuerpo cuando el sorgo es consumido, convirtiéndolo en una opción atractiva para las personas con problemas de diabetes y/u obesidad (Chávez et al. 2018).

El explotado de sorgo se obtiene mediante un proceso de expansión que consiste en someter el grano a altas temperaturas durante corto tiempo, obteniendo la gelatinización parcial y expansión del endospermo, seguido de la ruptura del pericarpio (Cabrera-Ramírez et al. 2020). Generalmente, se toman en cuenta tres variables esenciales al definir la calidad de un explotado: volumen de expansión, número de granos no explotados y tamaño del grano explotado (Vázquez-Carrillo et al. 2019). Diferentes factores actúan modificando la calidad del explotado. Mohamed et al. (1993), Sweley et al. (2013) y Vázquez-Carrillo et al. (2019), consideran que el grosor del pericarpio, variedad del grano, tamaño, forma, densidad y dureza

del grano, así como la textura del endospermo, contenido de humedad del grano, los parámetros del proceso de explotado y el método mediante el cual se lleva a cabo, son las variables que influyen al caracterizar el producto final.

Actualmente diferentes autores han obtenido explotados de sorgo mediante los métodos más comúnmente usados en la industria alimentaria, tales como aire caliente (Cabrera-Ramírez et al., 2020; Castro-Campos et al., 2021) y horno de microondas (Mishra, Joshi, Mohapatra, et al. 2015; Mishra, Joshi, y Mohapatra 2015). Por otro lado, los alimentos mínimamente procesados son mayormente preferidos que los ultraprocesados. Por esta razón, se ha popularizado la utilización de métodos de explotado convencionales, como el método de tierra caliente (Kora 2019) y el de sartén con aceite (Paraginski, de Souza, et al. 2016).

De forma general, el incremento del desempeño de los procesos sin aumentar costos es un tema de interés. Para lograr este propósito, es necesario hacer la optimización del proceso. La optimización se refiere al hallazgo de las condiciones bajo las cuales se obtiene la mejor respuesta de interés (Vera Candiotti et al. 2014). Una forma de estudiar el efecto individual, así como de interacción, de diferentes factores de entrada sobre las variables respuesta es el diseño factorial. Sin embargo, existen casos en los que no se obtiene el nivel de mejora deseado. En esos casos, es necesario desplazar la etapa experimental a la exploración de la región experimental z. Así, con el fin de diseñar y optimizar las condiciones de operación del sistema, es necesaria la aplicación de la metodología de superficie de respuesta. Esta metodología consiste en un análisis estadístico de regresión para un modelo óptimo. Al emplear la metodología de superficie de respuesta se obtienen predicciones dentro de todo el rango del diseño, adquiriendo así aquellas que conllevan a la mejor calidad (Kazemian et al. 2021).

A pesar de que existen diversos estudios acerca del proceso y obtención de explotados de sorgo, aún existen discrepancias y variabilidad; por lo que no se ha propuesto un método estandarizado para obtener las mejores características del sorgo. La estandarización y optimización del proceso de explotado de sorgo ayudará a obtener un producto final con características adecuadas para su uso y comercialización. Dicha optimización reducirá errores en el proceso, y al mismo tiempo se minimizarán tiempos de producción y desperdicio

de granos. Por otro lado, este logro convertirá al explotado de sorgo en un producto rentable y competitivo dentro del mercado. Por lo anterior, resulta importante determinar el método y condiciones de explotado que generen las mejores características de índice de expansión y rendimiento del proceso.

Por lo tanto, la presente investigación tiene como objetivo principal determinar mediante superficie de respuesta, las condiciones de explotado que generen las mejores características de índice de expansión y rendimiento del proceso en sorgo explotado. En primera instancia se proporciona un panorama general que permite visualizar el campo de aplicación de la investigación. También se abarca el planteamiento del problema, así como su justificación. Sucesivamente, se presentan los antecedentes y estado del arte, describiendo los conocimientos e investigaciones previas a este proyecto. Después se presentan la hipótesis y objetivos a desarrollar. Posteriormente se describen los materiales y métodos utilizados en el proyecto. Finalmente, se discuten los hallazgos generados a lo largo de la investigación y se exhibe el conocimiento obtenido mediante el mismo.

1.1 Planteamiento del problema y justificación

A pesar de los beneficios nutritivos y ventajas de cultivo que presenta el sorgo éste es considerado un cereal marginal en comparación con el arroz, trigo y maíz. Mundialmente, sólo el 42% de los seres humanos consumen sorgo. Como alimento humano, el sorgo es consumido en forma de papilla, pan, cuscús, tortillas, harinas, galletas y algunas bebidas alcohólicas (Chávez et al. 2018; Sharanagat et al. 2019). Una aplicación ampliamente utilizada, principalmente en India, son los explotados de sorgo (*popsorghum*) (Chávez et al. 2018; Mishra et al. 2014; Sharma et al. 2014). Sin embargo, el sorgo es un producto poco conocido en México, e incluso desconocido en algunas regiones. En los estados mexicanos donde se utiliza el sorgo sólo se destina a la alimentación para ganado. Por lo que la mejora del proceso de obtención de explotados de sorgo ayudará a popularizar dicha aplicación, y por consecuente al grano.

Recientemente se ha estudiado la producción y caracterización de explotados de sorgo (Cabrera-Ramírez et al. 2020; Castro-Campos et al. 2021). Los autores encontraron en el grano características apropiadas para obtener explotados de sorgo. Sin embargo, no se han

explorado los efectos del uso de diferentes métodos para la obtención de estos. Una comparación entre procesos es útil para conocer, medir la calidad y rendimiento de los mismos. Al evaluar las variables de interés en el producto final, será posible identificar el método capaz de generar los mejores resultados y un producto óptimo, así como modelar un proceso con mejora de eficiencia.

Por otro lado, el sorgo es un producto popular utilizado como alimento para ganado en muchos países. México ocupa el sexto lugar entre los países productores de sorgo, y es uno de los principales consumidores al utilizarlo como forraje ([SIAP 2020](#)). Tamaulipas, Guanajuato, Sinaloa y Michoacán son los estados productores centrales. No obstante, como resultado del poco uso del grano, el sorgo es vendido a bajo precio en México (\$3,553 por tonelada), en comparación con el maíz (\$6,278 por tonelada) ([SADER 2021](#)). El bajo precio afecta a los productores, ya que reciben bajo salario ([FIRA 2015, 2019](#)).

Al ser un alimento con múltiples beneficios para los humanos, especialmente para aquellos que padecen celiaca, diabetes o alergias al trigo, la creación y desarrollo de productos en los cuales se pueda consumir el sorgo es esencial. De igual manera, al encontrar una aplicación para el consumo humano, el cereal podrá tener un valor agregado que le permita participar en mercados más competitivos; a su vez, esto se reflejará en un impacto social para los agricultores.

Por último, la optimización del proceso de explotado de sorgo ayudará a obtener un producto final con características adecuadas para su uso y comercialización. Dicha optimización reducirá errores en el proceso, y al mismo tiempo se minimizarán tiempos de producción. Este logro convertirá al explotado de sorgo en un producto rentable dentro del mercado, con un mayor valor comercial entre las percepciones del consumidor. Lo anterior debido a que, al ser un producto poco consumido, esta innovación generará satisfacción en los consumidores, así como futuras oportunidades de ingresos.

Al utilizar la metodología de superficie de respuesta se busca determinar el punto óptimo dentro de la región de operabilidad. De acuerdo con [Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar \(2008\)](#), la delimitación de esta región se convierte en un mayor reto para el experimentador, ya que requiere de una estrategia más completa, llevando a cabo varios experimentos y utilizando otras técnicas de análisis.

Dentro de este marco, otro factor de importancia es la selección del diseño experimental adecuado. Dentro de la metodología de superficie de respuesta, existen dos que permiten el ajuste de modelos de regresión cuadrática: el diseño central compuesto y el diseño Box-Behnken. El diseño experimental tiene un rol importante debido a que, mediante el mismo, se obtendrán las características deseadas en el producto final. Al seleccionar un diseño de superficie de respuesta se espera que éste genere una distribución experimental de puntos satisfactoria dentro de la región de interés. El elegido debe permitir la adecuación del modelo, el ajuste de la investigación y la utilización de bloques experimentales. De igual manera, el diseño del modelo de superficie de respuesta debe proporcionar un mínimo número de corridas experimentales, evitando que éstas resulten en gran cantidad de pruebas. Finalmente, el diseño a utilizar debe garantizar la simplicidad de los cálculos de los parámetros del modelo ([Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar 2012](#); [Montgomery 2004](#)).

II. Antecedentes

2.1 El sorgo

El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) es el quinto cultivo más cosechado en el mundo (Figura 1). El sorgo es un grano es rico en proteínas, carbohidratos complejos y grasa. Este cereal de bajo costo se caracteriza por su eficiente uso del agua, resistencia a la sequía, gracias a su poca abundancia de hojas, y bajos requerimientos de fertilización del suelo. Generalmente, el sorgo se adapta a la mayoría de los tipos de suelos permeables. Gracias a las características mencionadas, la utilización del sorgo ayuda a combatir problemas de seguridad alimentaria; por lo que el sorgo es un cereal utilizado para consumo humano, alimentación animal y materia prima (Aruna et al. 2020; Chávez et al. 2018; Sharanagat et al. 2019).



Figura 1. Planta de sorgo

Elaboración propia

Al ser caracterizado por contener propiedades antioxidantes, el consumo de sorgo puede impactar de manera positiva a la salud humana. Se ha demostrado que los alimentos ricos en antioxidantes son de gran ayuda en la prevención de algunas enfermedades, tales como cardíacas, cerebrovasculares, aterosclerosis, diabetes mellitus, artritis reumatoide, osteoporosis, úlceras y cataratas (Lohani y Muthukumarappan 2021).

Dentro del ámbito internacional, el sorgo es el quinto cereal más importante; su producción es de 57.7 millones de toneladas. Mientras que, en el mercado nacional, el cultivo de sorgo ocupa el segundo lugar después del maíz ([Statista 2021](#)). Este distintivo lo convierte en uno de los cultivos de mayor importancia en México. Sin embargo, su consumo presenta una tendencia decreciente dentro de los últimos años ([FIRA 2019](#)). A pesar de que en los últimos años se ha promovido su utilización para consumo humano, casi la totalidad de la producción se destina al consumo animal ([Rodríguez del Bosque y Terán Vargas 2018](#)).

2.1.1 Principales partes del grano de sorgo

Los principales componentes anatómicos del cereal son el pericarpio, el germen y el endospermo ([Figura 2](#)).

El pericarpio es la parte externa del grano, y se encuentra conformado por tres subcapas: el epicarpio, el mesocarpio y el endocarpio. El pericarpio sirve de capa protectora contra el ataque de plagas y condiciones ambientales adversas. El germen (o embrión) es una parte muy pequeña, la cual almacena los nutrientes que se utilizarán durante la germinación. El mayor componente del grano es el endospermo, el cual actúa como tejido de almacenaje ([Cabrera-Ramírez 2015](#)).

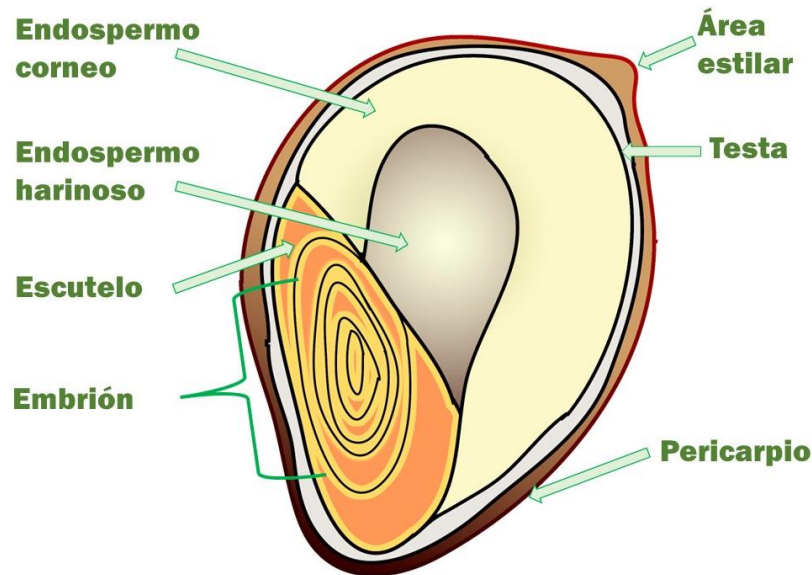


Figura 2. Componentes anatómicos del grano de sorgo

Elaboración propia

2.1.2 Principales usos y aplicaciones alimenticias del sorgo

En México el principal uso del sorgo es el consumo pecuario, representando cerca del 95.5% del consumo total del grano (FIRA 2019). Comúnmente se utiliza como sustituto de maíz en la dieta de algunas especies, siendo una gran fuente de energía para las mismas (Pan, An, y Zhu 2021). Por otro lado, gracias a las propiedades previamente mencionadas, diversos productos destinados al consumo humano pueden ser elaborados a partir de este grano. Estos derivados son capaces de satisfacer gran variedad de necesidades:

- **Harinas:** las harinas son utilizadas generalmente en la producción de galletas, pasteles, alfajores, waffles, madalenas y panes dulces (SADER 2016).
- **Malta:** el sorgo contiene β -amilasa y el nitrógeno α -amino libre, por lo que reporta buenos índices para la producción de cerveza (Olamiti et al. 2020).
- **Aceite:** el aceite de sorgo es semejante al aceite de maíz, con mayor proporción de cera en su composición. Este producto tiene aplicaciones gastronómicas y medicinales (SADER 2016).
- **Bebidas alcohólicas destiladas:** similares al vodka, producidas tradicionalmente en China (Dial 2012).

Actualmente, la demanda en el mercado se encuentra dirigida a la comida fácil de consumir con características nutricionales, sabor agradable y asequibles, como las botanas. Las botanas más populares en el mundo son las palomitas de maíz, gracias a las ventajas que ofrece en comparación con otras botanas, tales como alto contenido en fibra, antioxidantes, hierro y magnesio, y bajo contenido de calorías (Clayton et al. 2019; Momanyi et al. 2020; Vázquez-Carrillo et al. 2019). Una aplicación popular, utilizada principalmente en India, son los explotados de sorgo (*popsorghum*), los cuales son otra botana adecuada para el consumo humano (Chávez et al. 2018; Mishra et al. 2014; Sharma et al. 2014).

2.2 Proceso de explotado

El explotado de sorgo se obtiene mediante un proceso de expansión, el cual consiste en someter el grano a altas temperaturas durante corto tiempo, obteniendo la gelatinización parcial y expansión del endospermo, seguido de la ruptura del pericarpio (Cabrera-Ramírez et al., 2020). Al explotar granos, generalmente la temperatura mínima utilizada es de 200 °C. Cuando el grano excede una temperatura crítica, su humedad interna pasa a estado de evaporación y alcanza un equilibrio termodinámico a la presión del vapor. Al sobrepasar la temperatura de la presión de vapor crítica, la cáscara se rompe (Virot y Ponomarenko 2015). El explotado de cereales es uno de los métodos más económicos y tradicionales utilizados en la preparación de snacks (Golubinova et al. 2017). Someter granos al proceso de explotado otorga valor agregado al producto, como sabor, textura y aroma agradable (Mishra et al. 2014).

De acuerdo con Vázquez-Carrillo et al. (2019), la calidad de explotado de los granos generalmente es definida por tres variables: volumen de expansión, porcentaje (bajo) de granos no explotados, y el tamaño del grano explotado. Actualmente no existen rangos específicos para las cualidades mencionadas que se empleen en explotados de sorgo, debido a que es un tema poco estudiado.

Índice de expansión: Esta característica describe el incremento del grano una vez terminado el proceso de expansión, mediante la relación de los volúmenes inicial y final de la muestra. El índice de expansión es calculado mediante la ecuación 1, reportada por Mishra et al. (2015a):

$$\text{Índice de expansión (adimensional)} = \frac{V_f}{V_i} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde V_f representa el volumen final del sorgo explotado y V_i , el volumen inicial del sorgo (después del pretratamiento).

Porcentaje (bajo) de granos no explotados: El grano no explotado se refiere a aquellos que no llegan a romperse, lo cual puede ocurrir debido a alguna fractura por la que se escapa el vapor de agua. El porcentaje de granos no explotados se calcula mediante la división del número de granos no explotados entre el número de granos contenidos inicialmente, tal como se indica en la [ecuación 2](#) (Vázquez-Carrillo et al. 2019).

$$\text{Granos no explotados} = \frac{\text{Número de granos no explotados}}{\text{Número inicial de granos}} \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Tamaño del grano explotado: El tamaño de grano explotado es un factor determinante de la calidad del explotado. Debido a que la venta de este producto se basa en su volumen, lo más conveniente para el producto final es un tamaño más grande (Cabrera-Ramírez et al. 2020). Dicho tamaño es definido por la [ecuación 3](#).

$$GR(\text{cm}^3) = \frac{\text{volumen total del explotado (ml)}}{\text{número de explotados (granos)}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Existen factores del grano que influyen con la calidad del explotado. De acuerdo con [Mohamed et al. \(1993\)](#), [Sweley et al. \(2013\)](#) y [Vázquez-Carrillo et al. \(2019\)](#), estos factores incluyen tamaño, forma, densidad y dureza del grano. Otros factores que también influyen son la textura y contenido del endospermo ([Cabrera-Ramírez et al. 2020](#)), contenido de humedad ([Mishra, Joshi, Mohapatra, et al. 2015](#)) y grosor del pericarpio ([Puangjinda, Matan, y Nisoa 2016](#)). Por su parte, los factores de proceso también son importantes. Se ha demostrado que el tiempo del procesamiento y la temperatura o potencia a la que es llevado a cabo, según sea el caso, incrementa la calidad del producto final ([Mishra, Joshi, y Mohapatra 2015](#)).

Contenido de humedad: el contenido de humedad se refiere a la cantidad de agua contenida en el material en relación con su masa total. Al ser materiales higroscópicos, es sustancial controlar la cantidad de agua presente en los granos. El contenido de humedad de los granos puede expresarse en base húmeda o en base seca. En ingeniería se emplea la base seca dado

que describe la tasa de secado. Por lo que la determinación de la humedad inicial (CH) del grano (ecuación 4) es un paso fundamental para su posterior acondicionamiento (Martines López 2012).

$$CH \text{ b. s. } (\%) = \frac{m_{H_2O} (g)}{m_h (g)} \times 100 \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde m_{H_2O} y m_h representan la masa de agua y la masa del grano seco, respectivamente.

Actualmente, los métodos de explotado más comúnmente usados en la industria alimentaria (Figura 3) son horno de microondas (Mishra, Joshi, Mohapatra, et al. 2015; Mishra, Joshi, y Mohapatra 2015), aire caliente (Aruna et al. 2020; Cabrera-Ramírez et al. 2020; Castro-Campos et al. 2021; Pugh, Awika, y Rooney 2017) y lecho fluidizado (Llopart y Drago 2016). Cada una de las formas de explotado genera características diferentes en el producto, por lo que es necesario conocer el fundamento de las técnicas para su optimización.

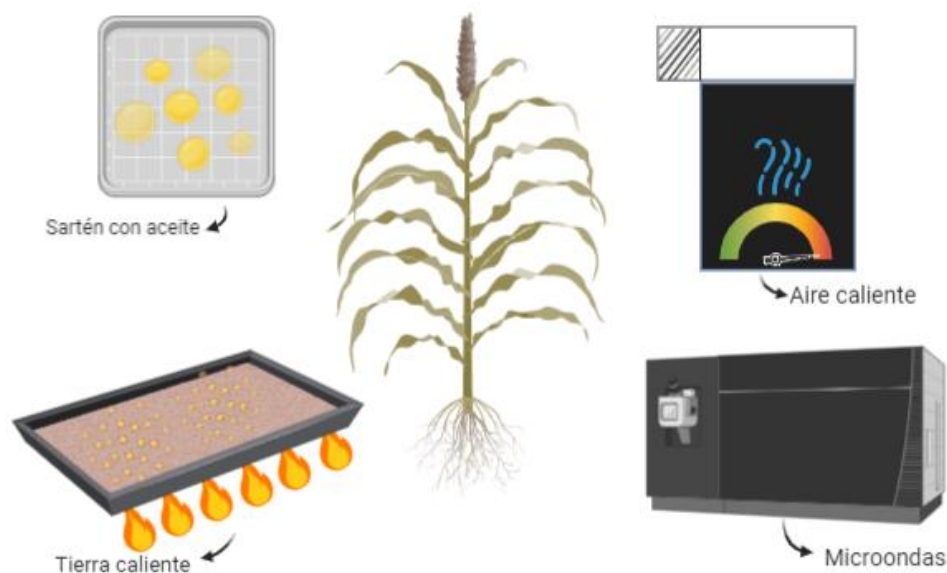


Figura 3. Métodos usados en el explotado de granos

(Vázquez-Sosa et al. 2021)

2.2.1 Explotado mediante aire caliente

Durante el proceso de explotado mediante aire caliente, el contenido de humedad se vaporiza. Este vapor migra mediante la microestructura del grano y escapa mediante la matriz proteica

y los espacios intercelulares para llegar a las microfracturas del grano (García-pinilla et al. 2019).

El utensilio para explotar granos mediante aire caliente está conformado por una unidad de ventilación y un vaso (Figura 4). La primera parte del vaso se encuentra montada sobre la unidad de ventilación, mientras la segunda tiene una abertura configurada para ventilar el aire presurizado (Mastroianni et al. 2015).

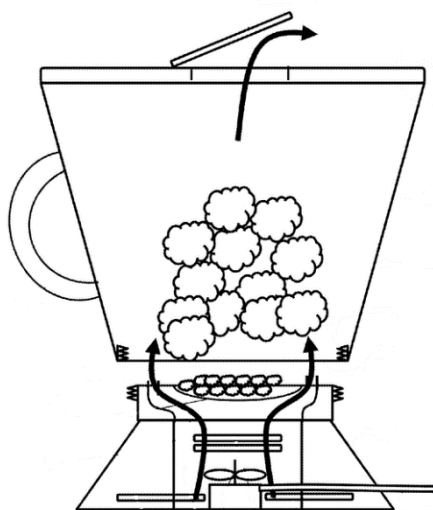


Figura 4. Equipo para explotado de granos mediante aire caliente

Fuente: Mastroianni et al. 2015

En distintos estudios se ha utilizado el método de aire caliente para lograr el explotado de granos de sorgo (Aruna et al. 2020; Cabrera-Ramírez et al. 2020; Castro-Campos et al. 2021; Pugh et al. 2017). Para alcanzar este objetivo, los autores ajustan variables de interés, tales como humedad del grano (10, 11 o 12%), temperatura del aire (estabilizada a 210 °C), y tiempo (90, 120 o 135 s). Como resultado, se encuentra reportada la obtención de explotados de sorgo con características deseadas, tales como desempeños de explotado (67.4 y 77.5%) y volúmenes de expansión (0.759 y 1.13).

De modo similar, el método de explotado mediante aire caliente ha sido aplicado en otro tipo de granos, como se puede apreciar en la investigación de Vázquez-Carrillo et al. (2019). En ese estudio, los investigadores obtuvieron granos de maíz explotados ajustando el contenido de humedad a 14%. Mientras que García-Pinilla et al. (2019) obtuvieron maíz explotado

ajustando la humedad a 9.14% y procesando a temperatura constante de 180 °C. Por su parte, [Konichi et al. \(2004\)](#) reportan la utilización del método en la obtención de explotados de amaranto. Durante la experimentación, la temperatura de aire fue estabilizada a 230 °C. Los autores llevaron a cabo el proceso en un rango de 10-30 s.

Un beneficio al utilizar el método mediante aire caliente para la obtención de explotados es la producción de altos niveles de expansión en el producto final, comparado con los reportados para el método de microondas. Sin embargo, el explotado mediante aire caliente tiene menos atención comercial debido al creciente uso del horno de microondas ([García-pinilla et al. 2019](#)).

2.2.2 Lecho fluidizado

El lecho fluidizado es un fenómeno físico que ocurre cuando cierta cantidad de partículas sólidas se coloca bajo condiciones apropiadas para causar que una mezcla de sólidos y fluido se comporte como fluido. Cuando se usa este método para el explotado, los resultados se ven influenciados por el contenido de humedad y la humedad del medio ([Mishra et al. 2014](#); [Tavanandi et al. 2020](#)).

Al producir explotados de sorgo mediante esta técnica ([Llopart y Drago 2016](#); [Tavanandi et al. 2020](#)), las variables de proceso que han provocado algún efecto hacia la variable respuesta son el tiempo, temperatura y contenido de humedad del grano. Se ha reportado el uso de temperatura del proceso dentro de un rango de 180-250 °C, tiempo de procesamiento de 60 s, y humedades de 12, 14 y 18%. Las variables dependientes evaluadas en las investigaciones previas han sido volumen aparente (de 5 a 10.8 y 10.3 a 19.1), desempeño del explotado (23.7 a 87.3 y 62.2 a 95.3), y habilidad del grano para explotar (1.1 a 13.2 y 6 a 13.1), así como valores nutricionales.

2.2.3 Microondas

Durante el calentamiento mediante microondas ([Figura 5](#)), el calor se genera por fricción molecular y transferencia de calor. En consecuencia, el almidón vítreo pierde humedad y se expande. La fuerza de impulso para la expansión que usa este método es la humedad ([van der Sman y Bows 2017](#)). Los factores esenciales para determinar la forma, volumen de expansión, densidad y eficiencia del explotado de los granos explotados mediante

microondas son el grado de gelatinización y el contenido de humedad de los granos (Lee et al. 2000).

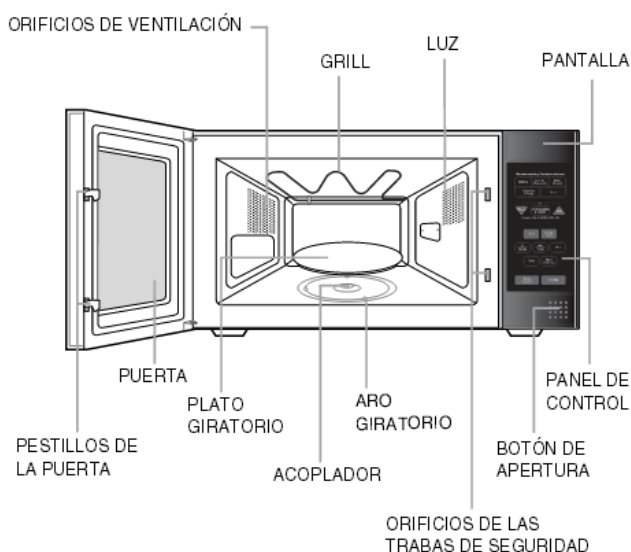


Figura 5. Partes del horno de microondas

Fuente: [Samsung 2018](#)

Existen estudios en los que se utiliza el horno de microondas como método para obtener explotados de sorgo. En estos procesos, el contenido de humedad, densidad de potencia del horno y el tiempo de residencia son las variables de control. En las investigaciones se reporta el acondicionamiento de los granos a niveles de humedad de 12, 16 y 20% (base húmeda) y de potencia en niveles de 9, 12 y 18 Wg^{-1} . El proceso es llevado a cabo durante 140 s, para muestras de 50 g ([Mishra, Joshi, Mohapatra, et al. 2015](#); [Mishra, Joshi, y Mohapatra 2015](#)).

Asimismo, la técnica se ha usado para explotar diferentes variedades de granos tales como arroz *paddy* ([Devi y Das 2017](#)), donde se ajustó el contenido de humedad a 14% (base húmeda), nivel de potencia del horno de microondas de 600 W y tiempo de procesamiento de 80 s. Del mismo modo, otros autores han explotado arroz tradicional ([Puangjinda et al. 2016](#)) con contenido de humedad de 14%, llevando a cabo el calentamiento por microondas durante 14 s a 900 W.

El explotado por medio de microondas presenta ventajas sobre otras técnicas, entre las que se encuentran calentamiento rápido, requerimiento mínimo de espacio, así como fácil

instalación, manipulación y operación. Sin embargo, existen algunas desventajas entre las que destaca la distribución poco homogénea de la radiación dentro de la cavidad del horno, ya que algunas partes reciben menor magnitud de energía que otras. Este hecho afecta la uniformidad de las características del explotado (Devi y Das 2017). En este sentido, un factor esencial para tener un buen proceso de explotado mediante microondas es el empaque. La capacidad del recipiente en cual se introduzca la muestra tiene efectos significativos en el volumen de expansión, ya que se relacionan proporcionalmente. Al existir mayor espacio disponible, e los granos se expanden con mayor libertad (Sweley, Rose, y Jackson 2013). De igual manera, una correcta distribución del calor es importante para que éste penetre de modo uniforme en la muestra (Chandrasekaran, Ramanathan, y Basak 2013).

2.2.4 Método de tierra caliente

Por otro lado, los alimentos mínimamente procesados son mayormente preferidos que los ultraprocesados. Un método para lograr el explotado de alimentos que cumple esta característica es el método de tierra caliente (Kora 2019). El uso de este método ha demostrado mejoría en la textura, crujido, volumen, digestibilidad, color, sabor y vida de anaquel de los granos explotados; adicionalmente, este método reduce los factores anti nutricios de los productos, en comparación con los alimentos ultra procesados (Sharma y Gujral 2011).

El método de explotado utilizando tierra caliente consiste en la exposición del cereal en arena precalentada (Figura 6). Para lograr esto, arena fina es calentada (200 – 300 °C) en un horno, sartén o en tostador eléctrico. Mientras la temperatura de la arena se encuentra aproximadamente en 250 °C, los granos deben ser vertidos en el tostador durante corto tiempo o hasta que comiencen a explotar. Así, la humedad interna de los granos se vaporiza mediante el microporo y se expande en el endospermo almidonado (Chinnaswamy & Bhattacharya, 1983; Mishra et al., 2014).



Figura 6. Método tradicional de explotado utilizando tierra caliente

Fuente: [Kora 2019](#)

El éxito al utilizar el método de tierra caliente y la calidad del producto final obtenido dependen del artefacto mediante el cual se calienta la arena, la temperatura de la arena, el perfil de la temperatura y el tiempo de exposición del grano ([Jogihalli et al. 2017](#); [Kora 2019](#)). Se encuentra reportado el uso de este método para obtener explotados de diferentes cereales, tales como garbanzo ([Jogihalli et al. 2017](#)), cebada ([Sharma y Gujral 2011](#)), arroz ([Mir et al. 2015](#)) y maíz ([Kora 2019](#)). En las investigaciones, los autores ajustan de humedad del grano en un rango entre 10 y 13%. Los granos son habitualmente calentados a temperatura variante de 210-350 °C durante 20 s, 5 min y hasta 6 min. Estudios afirman que el incremento de la temperatura del instrumento de calentamiento por sobre 350 °C podría quemar los granos. Para asegurar el calentamiento uniforme al utilizar este método, los granos deben ser agitados con la arena ([Jogihalli et al. 2017](#); [Kora 2019](#); [Mir et al. 2015](#); [Sharanagat, Singh, y Kumar 2018](#); [Sharma y Gujral 2011](#)). No obstante, esta metodología no ha sido aprovechada en la industria.

2.2.5 Método de sartén con aceite

Otro método convencional para el explotado de granos es mediante sartén con aceite ([Figura 7](#)). Al utilizar este método, la expansión de los granos ocurre cuando la presión y la

temperatura interna del mismo alcanzan valores mínimos de 135 psi y 177 °C, respectivamente (Bayomy 2017).

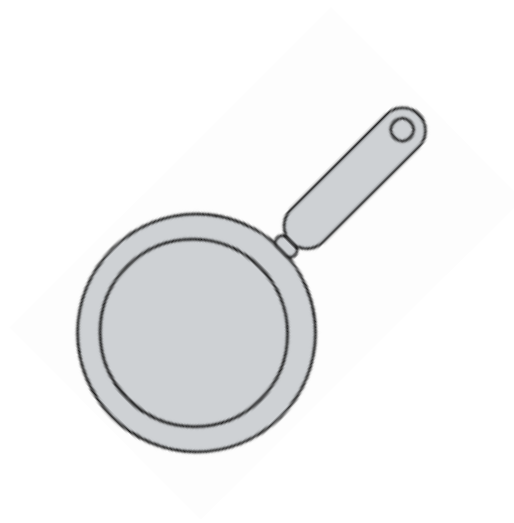


Figura 7. Método tradicional de explotado usando sartén

Elaboración propia

El procedimiento para el explotado utilizando sartén con aceite consiste en colocar los granos en una sartén convencional de cocina, la cual se debe encontrar cerrada. Antes del experimento, los granos se deben acondicionar al contenido de humedad deseado. El contenido de humedad reportado varía entre 14-15% (Rooney y Rooney 2013). Posteriormente, es fundamental agregar aceite comestible debido a que sin éste no es posible conseguir el explotado al utilizar este método (Paraginski, Lamas de Souza, et al. 2016). De tal forma, 4% de aceite comestible (el cual puede ser aceite de soya o aceite de maíz) se revuelve con los granos (Bayomy 2017; Paraginski, Lamas de Souza, et al. 2016). Un método alternativo es calentar el aceite a 230 °C durante 30 s antes de la incorporación del grano (Rooney y Rooney 2013). El método de explotado mediante sartén con aceite requiere altas temperaturas para lograr su finalidad, las cuales pueden variar entre 200 y 230 °C. En promedio, el proceso de explotado está completo después de 90 s.

La regulación de las variables de entrada, siendo éstas contenido de humedad, temperatura del aire y tiempo, es un paso crítico para obtener un producto final adecuado (Aruna et al. 2020; Cabrera-Ramírez et al. 2020; Pugh et al. 2017).

2.3 Caracterización del producto final

2.3.1 Propiedades volumétricas y de rendimiento

Al finalizar el proceso, la calidad del grano explotado se mide mediante el cálculo de volumen específico, índice de expansión, porcentaje de granos no explotados, desempeño de explotado y rendimiento del proceso. Entre las variables mencionadas, destaca el índice de expansión, dado que las palomitas son vendidas en unidad de volumen y no de peso (Vázquez-Carrillo et al. 2019).

Volumen: se define como la extensión del producto en tres dimensiones (Ecuación 5)

$$V (cm^3) = \frac{\text{peso de la muestra (g)}}{\text{densidad (g/mL)}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Desempeño de explotado: estima la capacidad del grano y cuán productivo es. Este parámetro define la habilidad del sorgo para explotar (Llopart y Drago 2016) (Ecuación 6).

$$DE(\%) = \frac{\text{peso del grano reventado (b.s.)}}{\text{peso inicial (b.s.)}} * 100 \quad \text{Ecuación 6}$$

Rendimiento del proceso: indica la capacidad del proceso para generar explotados, y se calcula mediante la Ecuación 7 (Mishra, Joshi, y Mohapatra 2015)

$$RP(\%) = \frac{W_{fpg}}{W_{fpg} + W_{spg} + W_{upg}} * 100 \quad \text{Ecuación 7}$$

2.3.2 Microestructura

La microscopía es el conjunto de técnicas y métodos destinados a hacer visibles objetos de estudio cuyo tamaño es tan pequeño que están fuera del rango de resolución del ojo humano. La técnica de microscopía electrónica implica la difracción, reflexión o refracción de una onda electromagnética o haz de electrones interactuando con la muestra, y la recolección de la radiación dispersada para crear una imagen (Reyes Gasga 2020). La evaluación de la microestructura de muestras o materiales se lleva a cabo mediante esta técnica usando un microscopio electrónico de barrido. Este microscopio funciona bajo condiciones adaptadas al objetivo de la investigación, regulando el rayo de electrones y el aumento del lente (Rosas Saito 2020).

2.3.3 Análisis de perfil de textura

El Análisis de Perfil de Textura es una prueba de doble compresión útil para determinar las propiedades texturales de un alimento. Este procedimiento instrumental simula la masticación de la mandíbula, ayudando a medir y cuantificar los parámetros de dureza, gomosidad, masticabilidad, elasticidad, cohesividad, entre otros. Estos parámetros se relacionan con variables como la tasa de deformación aplicada y la composición del producto. Durante el análisis de perfil de textura las muestras se comprimen dos veces usando un texturómetro. Comúnmente se le llama “prueba de dos mordidas”, ya que se imita la acción de una boca masticando el producto ([Hamouchene y Aoua 2014](#)).

2.4 Optimización de procesos

A pesar de que existen muchos estudios acerca del proceso de explotado y obtención de explotados de sorgo, no se ha propuesto un método estandarizado. En ese sentido, el incremento del desempeño de un sistema o proceso sin aumentar sus costos es un tema de interés general. Para lograr este propósito es necesario modelar los parámetros de entrada mediante un proceso de optimización. La optimización se refiere al hallazgo de las condiciones bajo las cuales se obtiene la mejor respuesta al finalizar proceso ([Vera Candiotti et al. 2014](#)).

2.4.1 Diseños factoriales

Una forma de estudiar el efecto individual y de interacción de varios factores sobre una o varias respuestas es a través de un diseño factorial. Para analizar la manera en que influye cada factor sobre la variable de respuesta es necesaria la elección de al menos dos niveles de prueba para cada uno de ellos, seguido de la creación del arreglo factorial. Si la investigación involucra muchos factores se pueden correr fracciones de diseños factoriales. Otra ventaja de esta técnica es su posible manejo en combinación con diseños de bloques, en caso de que no sea posible correr todo el diseño factorial bajo las mismas condiciones. Por último, al utilizar este diseño, la interpretación y cálculo de los efectos se puede hacer con aritmética elemental ([Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar 2012](#)).

2.4.2 Diseño factorial 3^k

El diseño factorial 3^k se refiere a un arreglo de k factores con 3 niveles cada uno: bajo, medio y alto. En comparación con un diseño más simple (2^k), la adición de un tercer nivel a los factores en el diseño 3^k presenta como ventaja que su relación con la respuesta se modele de forma cuadrática. El modelo estadístico para este tipo de diseño está dado por la [Ecuación 8](#).

$$Y_{ijk} = \mu + \gamma_i + \delta_j + (\gamma\delta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde γ_i representa al efecto del factor A en el nivel i , δ_j , el efecto del factor B en su nivel j , $(\gamma\delta)_{ij}$, es el efecto de la interacción de los niveles ij y k es el número de repeticiones por tratamiento. Posteriormente, con la información obtenida se prueban las siguientes hipótesis:

- $H_0: \gamma_i = 0$, no existe efecto significativo del factor A sobre la variable respuesta
- $H_1: \delta = 0$, no existe efecto significativo del factor B sobre la variable respuesta
- $H_2: (\gamma\delta)_{ij} = 0$, no existe efecto de la interacción de los factores A y B sobre la variable respuesta.

2.4.3 Metodología de superficie de respuesta

Existen casos en los que no se obtiene el nivel de mejora deseado. De ser así, es necesario desplazar la etapa experimental aplicando una estrategia diferente ([Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar 2012](#)). La selección del diseño de experimentos a utilizar depende de los objetivos que se tienen, tales como establecer una comparación entre los factores, demostrar los efectos principales de un proceso, encontrar los ajustes óptimos del proceso, o la optimización de respuestas cuando se tienen factores mezclados ([NIST 2013a](#)).

A fin de determinar las condiciones de operación óptimas del sistema es necesario emplear la metodología de superficie de respuesta (*RSM*, por sus siglas en inglés). Esta metodología es una colección de técnicas estadísticas y matemáticas, así como una popular técnica dentro del ámbito del diseño de experimentos para optimizar, desarrollar y mejorar experimentos. Esto gracias a que es adaptable al optimizar diferentes tipos de procesos ([Kazemian et al. 2021](#); [Kenawy et al. 2019](#)). El propósito de esta técnica es analizar problemas mediante un modelo empírico.

Esta metodología consiste en realizar un análisis estadístico de regresión para conseguir un modelo óptimo. Así, la *RSM* puede modelar la respuesta en términos de los parámetros

significantes, sus interacciones y términos cuadráticos. Al utilizar esta metodología la ambigüedad es reducida, ya que ayuda a realizar la toma de decisiones bajo ciertas condiciones. También esta técnica ayuda a mantener eficiencia económica y de tiempo (Del Angel Sánchez et al. 2015; Gopalakannan y Senthilvelan 2013).

A diferencia de los diseños factoriales, donde el mejor tratamiento es el “ganador” entre los que se examinaron en el estudio, al emplear la metodología de superficie de respuesta se busca determinar el punto óptimo. El punto óptimo se refiere a la mejor combinación de factores estudiados en la región de operabilidad (Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar 2012).

Al utilizar RSM es necesaria la selección de un diseño experimental. Por ello es primordial optar por el apropiado según el fenómeno a analizar. Si el objetivo del experimento es conocer la superficie de respuesta analizando de 2 a 4 factores, generalmente se utiliza el diseño central compuesto o el diseño Box-Behnken (NIST 2013a). Los diseños experimentales permiten conocer los tratamientos para obtener los datos para el ajuste y análisis. Posterior a la aplicación del diseño, el análisis de varianza (ANOVA) es utilizado para identificar los parámetros del proceso que influyen de manera significativa en los resultados. Para predecir una respuesta considerando los parámetros de entrada se utiliza una ecuación regresiva polinomial de segundo orden. De esta forma, la RSM puede predecir el efecto de los parámetros sobre la respuesta (Chelladurai et al. 2020; Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar 2012; Montgomery 2004).

Diferentes autores han utilizado diseños de metodología de superficie de respuesta para optimizar una gran variedad de procesos expansión, haciendo uso de diferentes diseños experimentales para ajustar superficie de respuesta. Tales diseños son el diseño Box-Behnken (Joshi y Mohapatra 2013; Mishra, Joshi, y Mohapatra 2015; Subramani et al. 2020) y el diseño central compuesto (Mir et al. 2015; Raigar, Upadhyay, y Mishra 2017).

2.4.4 Diseños de superficie de respuesta

Los diseños de superficie de respuesta se refieren a aquellos experimentales que pueden ser usados cuando el objetivo de la investigación es ajustar algún modelo para describir la superficie de respuesta. Estos diseños proporcionan las corridas experimentales necesarias para ajustar el modelo que describa a la variable (Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar 2012).

Un adecuado diseño de experimentos destaca por contener las siguientes características (Gil Martínez 2020):

- Distribuye razonablemente los puntos de datos e información.
- Permite el estudio de la falta de ajuste.
- Provee estimadores precisos de los coeficientes del modelo.
- Permite la ejecución de experimentos en bloques.
- Requiere un número mínimo de corridas experimentales, así como de niveles de las variables independientes.
- Es ortogonal, ya que los términos del modelo ajustado y las estimaciones de los parámetros no presentan correlación.
- Presenta rotabilidad, dado que la varianza de la respuesta estimada depende únicamente de la distancia de un punto x al centro del diseño, y no de su dirección.

Existe una relación directa entre el tipo de modelo a ajustar y el diseño elegido. Un diseño experimental no puede proporcionar más información de la que es capaz de dar. Por lo cual, existen dos grupos de diseños experimentales:

a) Diseños de primer orden

Los diseños de primer orden son utilizados para ajustar modelos en los que los efectos principales son la única importancia. En estos casos no existen los efectos de interacción. Al seleccionar un diseño de primer orden la varianza de la respuesta debe ser mínima (Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar 2012).

b) Diseños de segundo orden

Los diseños de segundo orden permiten el ajuste de un modelo de segundo orden, así como el estudio de los efectos lineales, de interacción, cuadráticos o de curvatura. Estos diseños son empleados en situaciones en las cuales el objetivo es explorar una región más compleja. Estos modelos están dados por la Ecuación 9 (Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar 2012).

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad \text{Ecuación 9}$$

2.4.5 Diseño central compuesto

El diseño central compuesto (CCD) es comúnmente aplicado en conjunto con la superficie de respuesta, gracias a la minimización de errores en términos de las combinaciones de experimentos y su eficiente expresión respecto a las funciones complejas de la respuesta (Zbair et al. 2018). Este diseño es el más utilizado e importante para ajustar modelos de segundo orden (Figura 8). El CCD consiste en N experimentos distribuidos en n_F experimentos de dos niveles factoriales, $2k$ experimentos de diseño axial (puntos de estrella) y n_C puntos centrales.

Estos diseños comienzan con un diseño factorial o factorial fraccionado con puntos centrales, prolongado con un grupo de puntos axiales o puntos de estrella, los cuales permiten estimar la curvatura. Independientemente del número de factores a analizar, todos deben ser evaluados en cinco niveles diferentes (Mousavi, Parvini, y Ghorbani 2018; NIST 2013b). Generalmente se utiliza la codificación de factores, ya que facilita los cálculos, estandariza las variables eliminando sus unidades de medida originales, e incrementa la precisión al momento de estimar los coeficientes del modelo (Jiménez Careaga 2015).

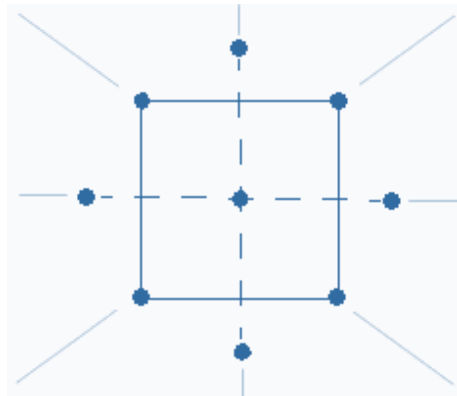


Figura 8. Diseño central compuesto

Fuente: Minitab 2019

A continuación, se enlistan las ventajas que posee el diseño central compuesto (Kenawy et al. 2019):

- Precisión experimental: estima eficientemente los términos de primer y segundo orden

- Mínimo de ensayos experimentales requerido: permite ajustar la superficie de respuesta teniendo un bajo número de experimentos.
- La información obtenida es útil para realizar el ajuste.
- Permite ampliar experimentos factoriales

2.4.6 Diseño Box-Behnken

El diseño Box-Behnken (BBD) es un diseño de segundo orden generalmente utilizado cuando se encuentran involucrados dos o más factores, [Figura 9](#). Este diseño tiene la propiedad de que cada factor toma sólo tres niveles, donde el nivel más alto y el más bajo son variables conocidas, mientras que el tercero se construye mediante balance. Así que el diseño es creado por bloques incompletos balanceados, mezclados con factorial 2^k ([Montgomery 2004](#)). Una importante ventaja que presenta este diseño es que permite la reducción de factores y de perfiles; lo anterior ayuda a disminuir el esfuerzo al evaluar cada perfil, facilita el auto equilibrio de los factores y permite el estimado de un modelo en el cual las interacciones entre factores no se confundan ([Huertas-García et al. 2014](#)).

Este diseño excluye a los vértices de la región experimental como tratamiento. Gracias a esta propiedad se convierte en un diseño rotatable o casi rotatable ([Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar 2012](#)). Los resultados obtenidos a través del diseño Box-Behnken son eficientes gracias al número de corridas que proporciona y su rotabilidad. Otra ventaja que destaca al BBD es que no incluye puntos experimentales con valores máximos de los factores. Esto último se refiere a que el diseño no contempla puntos en los vértices del diseño cúbico o puntos factoriales 2^k ([Gil Martínez 2020](#)).

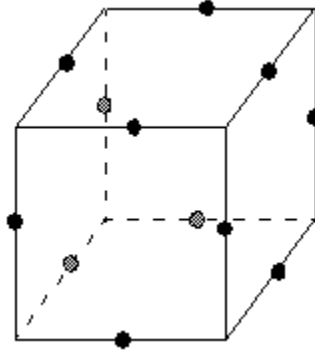


Figura 9. Diseño Box-Benhken

Fuente: Minitab 2019

Según Gil Martínez (2020), el número de corridas experimentales requeridas al utilizar el diseño Box-Benhken está dado por la Ecuación 10.

$$N = 2k(k - 1) + n_c \quad \text{Ecuación 10}$$

Gracias a que requiere menos puntos experimentales que el CDD, es menos costoso llevarlo a cabo (Gil Martínez 2020).

El diseño Box-Benhken ha sido empleado en la optimización de procesos de expansión de diferentes productos, como cebada (Hong et al. 2020), arroz (Joshi y Mohapatra 2013; Minati y Das 2011), quinoa (Subramani et al. 2020) y sorgo (Mishra, Joshi, y Mohapatra 2015). Las variables independientes consideradas por los autores son contenido de humedad del producto inicial, temperatura y tiempo del tratamiento. Además, si el proceso lo requiere se debe considerar la densidad de potencia del horno de microondas. Durante el proceso de optimización todas las variables mencionadas se prueban a diferentes niveles. El análisis de coeficientes del modelo de regresión se lleva a cabo mediante la técnica de análisis de varianzas (ANOVA), con la finalidad de encontrar el nivel de significancia de cada coeficiente. Las variables dependientes evaluadas han sido aquellas que indican la mejor calidad en el producto final; éstas son radio de expansión, rendimiento de explotado y aceptabilidad.

2.4.7 Método de la función de deseabilidad

El método de la función de deseabilidad estudia las variables de entrada, evaluando el grado de satisfacción y ajuste que proveen a la respuesta de interés en un rango de 0 a 1 (Rudnykh y López Ríos 2018). Esta respuesta se puede dividir en:

- a) Deseabilidad individual: evalúa la manera en la que se optimiza una respuesta
- b) Deseabilidad global: evalúa la forma en la que se optimiza un conjunto de respuestas.

Mediante esta técnica es posible convertir los problemas de optimización multivariados en una optimización univariada, maximizando la deseabilidad global para obtener un punto óptimo. El método consiste en definir una función que mida la deseabilidad global del producto, maximizándola para obtener el punto óptimo de interés. La deseabilidad global se define como la media geométrica de las deseabilidades individuales (Ecuación 11).

$$DG = d_1^{W_1} \times d_2^{W_2} \times \dots \times d_k^{W_k})^{1/\sum W_i} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde d_i son las deseabilidades individuales de cada variable, y W_i los pesos constantes que permiten balancear la importancia relativa de cada variable. Entre mayor sea el peso de la variable, mayor será su deseabilidad sobre el punto óptimo global. Si la importancia es igual para todas las variables, W_i será igual a 1. En este sentido, el punto óptimo simultáneo será aquel en el cual la función DG es máxima (Danbaba et al. 2018).

Es posible visualizar que el uso de la metodología de superficie de respuesta tiene varias ventajas, dado que utiliza menos experimentos y proporciona una gran cantidad de información. Otra ventaja de este método es que hace posible observar el efecto de las interacciones de los parámetros independientes en la respuesta. También esta técnica predice los niveles óptimos del proceso y ayuda a obtener información sobre el mismo. Finalmente, esta metodología es económica. Una desventaja de esta metodología es el ajuste de los datos que se efectúa con una ecuación polinomial de segundo orden (Ba y Boyaci 2007; Manojkumar, Muthukumar, y Sharmila 2020).

Como se ha mostrado, diferentes métodos de expansión de granos han sido aplicados con el fin de obtener explotados de sorgo. Sin embargo, no existe un método optimizado para

conseguir el mejor desempeño. Por esta razón, el presente proyecto busca determinar mediante superficie de respuesta las condiciones de explotado que generen las mejores características de índice de expansión, número de granos explotados y rendimiento del proceso en sorgo explotado. Asimismo, se propone evaluar la factibilidad de obtener estas características y mejoras en los atributos de calidad para diferentes tipos de granos de sorgo aplicando el mismo método optimizado.

III. Hipótesis

Las condiciones de proceso usando diferentes métodos de explotado afectarán de forma significativa el índice de expansión y rendimiento del proceso. Las variables de entrada permitirán modelar su comportamiento y definir las mejores condiciones a través de un modelo de superficie de respuesta para encontrar el mayor índice de explotado de sorgo.

IV. Objetivos

4.1 Objetivo general

Determinar mediante un método de optimización las condiciones de explotado que permitan obtener el mayor índice de expansión y rendimiento del proceso en sorgo explotado.

4.2 Objetivos específicos

- Determinar el método que produzca el mayor volumen para los explotados de sorgo.
- Aplicar un modelo de superficie de respuesta para determinar los valores óptimos de las variables de proceso de explotado seleccionado anteriormente.
- Comprobar el modelo de superficie de respuesta obtenido.

V. Materiales y métodos

5.1 Aparatos y utensilios de laboratorio

Recipientes aptos para uso en microondas (0.5 L, marca JOY), agua destilada, horno de microondas (Samsung, modelo No. MR123C, Malasia), máquina de palomitas de aire caliente (Sunbeam popcorn maker, modelo No. FPSBPP7052. China), sartén (marca T-Fal, grosor 3 mm, altura 8 cm y radio 9 cm), aceite comestible (marca comercial Cristal ®), matraz Erlenmeyer.

5.2 Material biológico

Se utilizó la variedad de sorgo blanco “Paloma” donado por INIFAP Tamaulipas, la cual se limpió y seleccionó manualmente (retirar granos dañados, impurezas, granos pequeños, entre otras). La metodología de experimentación general a seguir durante el proyecto se muestra en la [Figura 10](#).

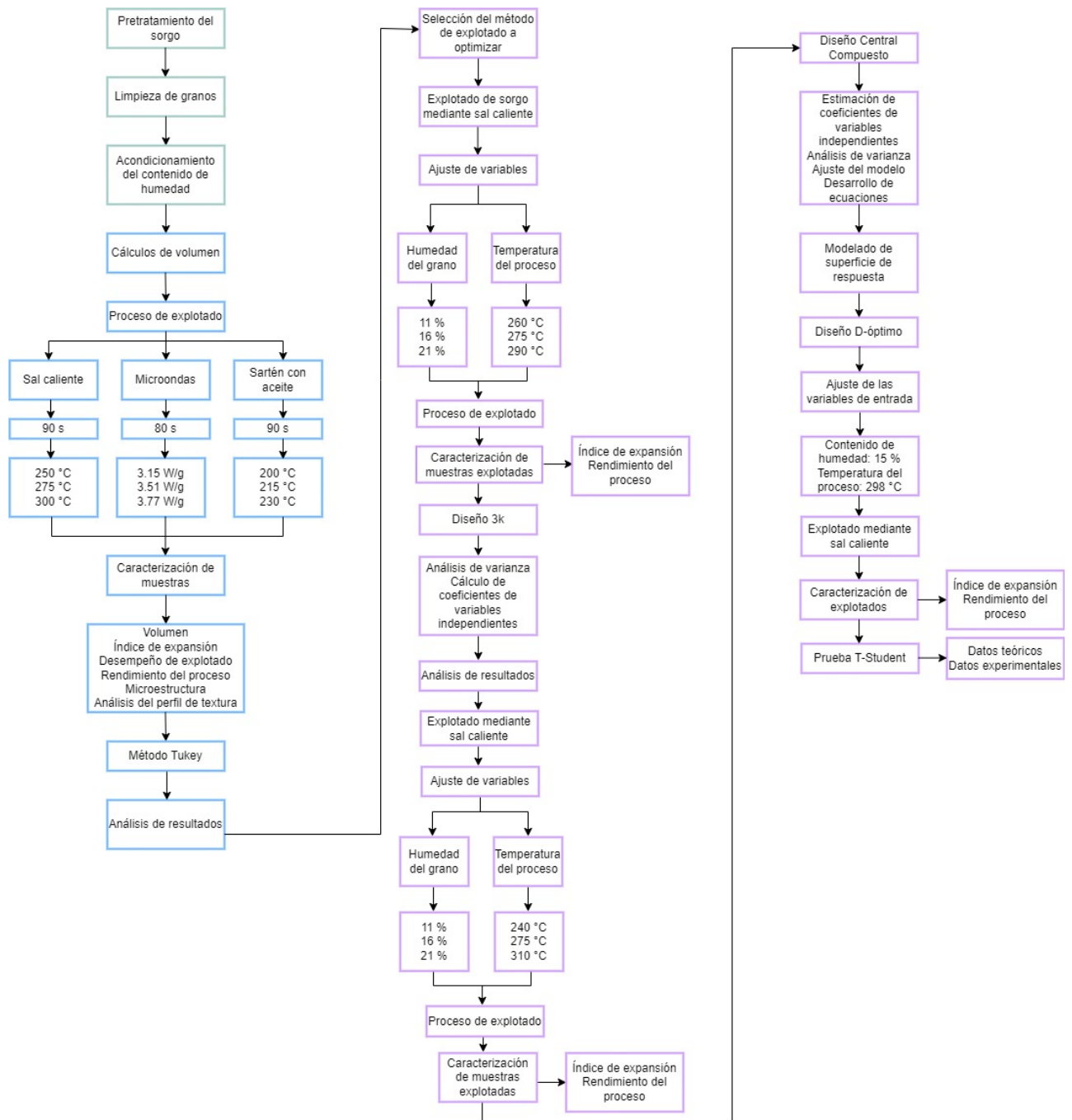


Figura 10. Diagrama de flujo del proyecto

Elaboración propia

5.3 Pretratamiento de sorgo

Se ajustó el contenido de humedad de 200 g de granos de sorgo al 11% mediante la [Ecuación 12](#), descrita por [Cabrera-Ramírez et al. \(2020\)](#). Una vez añadida la cantidad necesaria de agua

destilada, los granos se dejaron reposando durante 22 h en bolsas selladas a 4 °C.

$$Q = \frac{W_i(M_f - M_i)}{100 - M_f} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde Q representa los gramos de agua necesarios para el ajuste de humedad, W indica el peso de la muestra (g), M_f la humedad deseada (%) y M_i la humedad inicial (%).

5.4 Proceso de explotado

Con fines comparativos, los niveles de las temperaturas o niveles de potencia utilizadas (según sea el caso) se codificaron en términos de -1, 0 y 1 para los niveles bajo, intermedio y alto, respectivamente (Cuadro 1).

Cuadro 1. Nomenclatura de los tratamientos para explotado

Método de explotado	Nivel		
	-1	0	1
<i>Microondas (Wg^{-1})</i>	3.15	3.51	3.77
<i>Sartén con aceite (°C)</i>	200	215	230
<i>Sal caliente (°C)</i>	250	275	300

Nivel de significancia $\alpha=0.05$.

5.4.1 Microondas

El explotado mediante microondas se llevó a cabo en un horno de microondas convencional (Samsung, modelo No. MR123C, Malasia). La potencia de entrada (1555 W) es especificada por el modelo, así como la frecuencia de operación (2450 MHz). Dado que este modelo de microondas presenta niveles codificados de potencia (H, LP y HI), se calculó de la densidad de flujo de potencia (MWPD) en cada nivel, utilizando la Ecuación 13 descrita por Mishra, Joshi, & Mohapatra, (2015). Para ello se calentaron 150 mL de agua destilada durante 30 s independientemente, para cada uno de los niveles. Con ayuda de un termómetro digital (Peakmeter, modelo MS8229) con un termopar tipo K, se registraron las temperaturas inicial y final de cada muestra. Posteriormente, se calculó la diferencia de temperaturas resultante de cada potencia evaluada. El proceso se llevó a cabo por triplicado para cada una de las mismas. La densidad de flujo de potencia se calculó mediante la Ecuación 13, donde V_w equivale al volumen de agua (ml), T es el aumento de temperatura (°C), t es el tiempo de residencia, y w es el tamaño de la muestra (g). Se encontró que $MWPD_1=3.151$ W/g,

MWPD₂=3.5092 W/g y MWPD₃=3.7685 W/g, para las potencias H, LP y HI, respectivamente.

$$\text{MWPD (W/g)} = \frac{(4.1868)(V_w)(T)}{(t)(w)} \quad \text{Ecuación 13}$$

Para la obtención de los explotados, las muestras de granos (10 g) fueron colocadas en recipientes de plástico aptos para uso en microondas (0.5 L, marca JOY), y se explotaron durante 80 s para la DPM correspondiente al diseño.

5.4.2 Sartén caliente con aceite

En un sartén (marca T-Fal, grosor 3 mm, altura 8 cm y radio 9 cm) se colocó 16% de aceite de maíz de grado alimenticio (marca comercial Cristal ®), y se precalentó durante 90 s, hasta alcanzar la temperatura correspondiente al diseño:

- Nivel bajo (-1): 200 °C
- Nivel medio (0): 215 °C
- Nivel alto (1): 230 °C

La temperatura se controló con ayuda de un termómetro digital (Peakmeter, modelo MS8229) con un termo par tipo K. Cuando la temperatura se encontró en el nivel de interés, la muestra de sorgo (10 g) se vertió en el sartén y se colocó la tapa de este. El tiempo de residencia de cada muestra independiente fue de 120 s, basado en la metodología de [Rooney & Rooney \(2013\)](#), con algunas modificaciones.

5.4.3 Sal caliente

Para llevar a cabo esta metodología, nuevamente se establecieron tres diferentes niveles de temperatura para llevar a cabo el explotado.

- Nivel bajo (-1): 250 °C
- Nivel medio (0): 275 °C
- Nivel alto (1): 300 °C

Posteriormente, dentro de una olla de barro se colocaron 500 g de sal de mar previamente molida y libre de humedad, la cual se calentó durante diferentes tiempos para alcanzar los niveles de temperatura deseados: 25 min para alcanzar el nivel bajo, 35 min para el nivel intermedio, y 50 min para el nivel más alto. Estas temperaturas se controlaron utilizando un termómetro digital (Peakmeter, model MS8229) con un termopar tipo K.

Una vez alcanzada la temperatura deseada, se colocó la muestra de granos de sorgo (10 g) y se revolvió en conjunto con la sal durante 90 s. Los granos explotados y no explotados se recolectaron al terminar el tiempo de procesamiento.

5.5 Caracterización del explotado

Una vez obtenido el explotado de sorgo mediante los diferentes métodos se llevó a cabo la caracterización del volumen aparente, volumen de expansión, desempeño de explotado, tamaño del grano explotado y rendimiento del proceso.

5.5.1 Determinación de volumen

El volumen de los sorgos crudos y explotados se calculó mediante el método de desplazamiento de semillas (Cabrera-Ramírez et al. 2020; Llopart y Drago 2016). Brevemente, en un recipiente de forma cúbica con volumen conocido (465 cm^3) se colocaron semillas de chía, se registró el peso y la densidad de este. Posteriormente, los granos de sorgo se colocaron en el recipiente y se llenó con semillas de chía, se retiraron los granos y se registró el peso. El volumen fue calculado por diferencia de pesos y usando la densidad de la chía

5.5.2 Índice de expansión

Se calculó el volumen inicial de la muestra, así como el volumen final (después del proceso de explotado). Al tener los datos de ambos valores se calculó el índice de expansión mediante la [Ecuación 1](#).

5.5.3 Desempeño de explotado

Para estimar la utilidad y documentar cuán productivo es el proceso de explotado, se registró el peso inicial de la muestra y el peso de la muestra tras el explotado. El cálculo del

desempeño de explotado (DE) se realizó a través de la [Ecuación 14](#), publicada por [Llopart y Drago \(2016\)](#).

$$DE(\%) = \frac{\text{peso del explotado (b.s.)}}{\text{peso inicial (b.s.)}} \times 100 \quad \text{Ecuación 14}$$

5.5.4 Rendimiento del proceso

El rendimiento del explotado (RP) es un parámetro importante, ya que indica cuántos granos fueron completamente explotados durante el proceso. Para realizar el cálculo, los granos no explotados fueron seleccionados y contados. Los granos son considerados completamente explotados sólo cuando no contienen alguna parte no reventada. La [Ecuación 15](#) es utilizada para calcular el rendimiento del proceso de explotado ([Mishra, Joshi, y Mohapatra 2015](#)).

$$RE(\%) = \frac{W_{fpg}}{W_{fpg} + W_{spg} + W_{upg}} \quad \text{Ecuación 15}$$

5.6 Microestructura

La evaluación de la microestructura del sorgo explotado se llevó a cabo empleando un microscopio electrónico de barrido (SEM Phenom-World BV, The Netherlands), adaptado para trabajar a bajo vacío con un haz electrones ajustado a 5 kV. La muestra fue cortada de forma plana, la cual se fijó con cinta de carbono y se observó a 1100x (aproximadamente 50µm) ([Cabrera-Ramírez et al., 2020](#)). Finalmente, utilizando el software Phenom Image Viewer 1.0 se midió el ancho de las celdas del explotado.

5.7 Análisis de Perfil de Textura

Se utilizó el equipo Texture Analyzer (TA Plus, Lloyd instruments, Pennsylvania). La muestra se midió usando una plane probe de 50 mm de diámetro a velocidad constante de 1.00 mm/s. El análisis del perfil de textura se realizó colocando una muestra en la posición central, la cual fue compactada al 20 % de su altura inicial ejecutando dos compresiones por muestra. Para cada tratamiento se realizó la evaluación en 10 muestras independientes de explotados. Considerando los cálculos de la [Figura 11](#), se reportaron la dureza (N) como la fuerza máxima de la primera compresión, cohesividad (adimensional), elasticidad (mm), y masticabilidad (N).

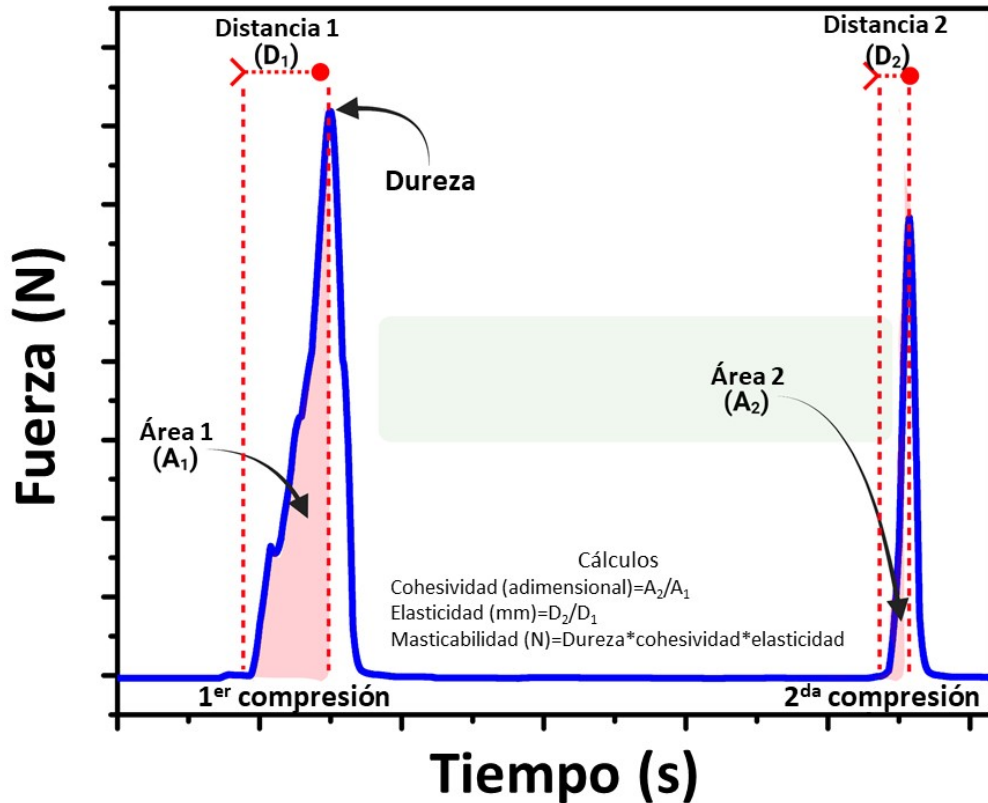


Figura 11. Curva característica de un análisis de perfil de textura y cálculo de parámetros texturales.

Adaptado de [Torres et al. \(2015\)](#).

5.8 Optimización del proceso

5.8.1 Diseño Central Compuesto

El diseño Central Compuesto fue implementado para optimizar el proceso de obtención de explotados de sorgo mediante el cual se obtuvo el producto con las mejores caracterizaciones (sal caliente). Las variables de entrada analizadas fueron temperatura del proceso y tipo de procesamiento. Las variables respuesta fueron índice de expansión y rendimiento del proceso. Los niveles de los factores se codificaron como -1 (bajo), 0 (punto central) y 1 (alto). Se utilizó un nivel de significancia $\alpha=0.05$.

El modelo de respuesta es representado de forma general mediante la [Ecuación 9](#), en la cual se consideran todos los términos lineales y cuadráticos, así como su interacción. En la [Ecuación 9](#) β_0 representa el término compensatorio, β_i es el efecto lineal de la variable de entrada X_i , y β_{ii} es el efecto de la interacción entre los factores de entrada X_i y X_j , X_i

corresponde a la variable de entrada “temperatura” y x_j corresponde a “tipo de proceso” (Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar 2012).

Los resultados fueron analizados considerando el coeficiente de determinación (R^2), análisis de varianza (ANOVA) y diagramas de superficie de respuesta. Los datos se procesaron mediante el software estadístico R® y RStudio® versión 4.0.2, utilizando la librería “rsm”. Para realizar el ajuste de segundo orden polinomial de los datos experimentales e identificar los términos significativos del modelo se utilizó un método de regresión no lineal.

5.8.2 Deseabilidad del proceso

Con la finalidad de conocer el valor óptimo del producto en términos de índice de expansión y rendimiento del proceso simultáneamente, se diseñó el modelo D-óptimo. Este modelo se emplea para determinar las condiciones experimentales, relacionando ambas variables con la respuesta mediante la [Ecuación 11](#). De este modo se convirtió en una ecuación de optimización multivariada. Con ayuda del Software estadístico JMP Pro 14® se diseñaron los puntos de deseabilidad para determinar el óptimo deseado. El análisis se llevó a cabo con un nivel de confianza $\alpha = 0.05$.

VI. Resultados y discusión

6.1 Caracterización del explotado

En la primera fase del estudio se evaluaron las características de los explotados de sorgo obtenidos mediante los métodos de microondas, sartén con aceite y sal caliente. Esto se llevó a cabo con la finalidad de conocer los procesos, y así detectar el método capaz de brindar el producto con las mejores características volumétricas y texturales.

6.1.1 Índice de expansión

El índice de expansión de los explotados obtenidos por los diferentes métodos y condiciones de procesamiento se muestra en la [Figura 12](#). En ese sentido, al comparar los resultados, no se encontró diferencia estadística significativa entre los 3 métodos. Sin embargo, sí existió entre los diferentes niveles utilizados en cada uno de estos. Se obtuvo el índice de expansión más alto al explotar los granos mediante el método de microondas en el nivel -1 (3.15 W/g) (5.18 ± 0.48), respecto a las explotadas mediante sartén con aceite y microondas. Sin

embargo, no se encontró diferencia estadística significativa ($p < 0.005$) entre los tres métodos.

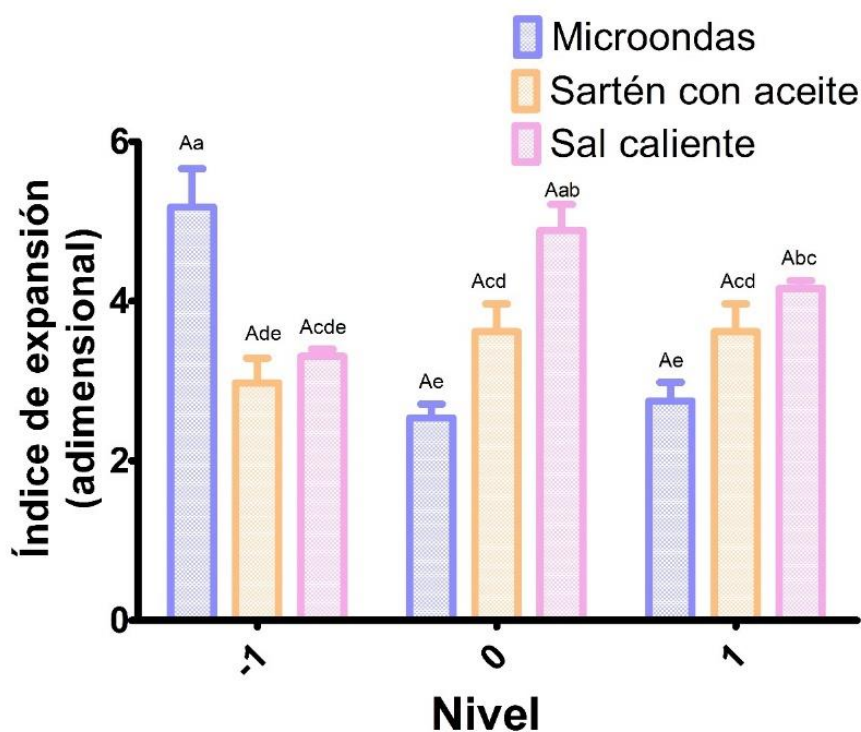


Figura 12. Índice de expansión (adimensional).

Letras mayúsculas diferentes indican diferencias estadísticas entre métodos, letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticas entre niveles ($p < 0.05$).

Por otro lado, en el método de sal caliente en el nivel 0 (275 °C) se obtuvo el índice de expansión más alto para este grupo (4.89 ± 0.33). Respecto a los explotados obtenidos mediante sartén con aceite, no existe diferencia estadística significativa entre los resultados obtenidos en el nivel 0 (215 °C) (3.62 ± 0.35) y el nivel 1 (230 °C).

En la literatura, algunos autores reportan índices de expansión de 11.2 para sorgo blanco R11404 explotado utilizando sartén con 5mL de aceite de maíz a 23 °C (Rooney y Rooney 2013). Por otro lado, [Mishra, Joshi y Mohapatra \(2015\)](#), obtuvieron índices de expansión de 14.21 ± 0.48 en explotados de sorgo rojo Mugad obtenidos mediante microondas. En dicho estudio, los autores llevaron a cabo el proceso en un horno de microondas con flujo de potencia de 18 Wg^{-1} . Cabe destacar que estos resultados son superiores a los encontrados en el presente estudio; sin embargo, el nivel térmico y la variedad de grano utilizados son diferentes.

6.1.2 Volumen

En la [Figura 13](#) se muestran los resultados de volumen obtenidos en los explotados de sorgo con los diferentes métodos y condiciones de procesamiento. No se observaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre los tres métodos de procesamiento. Sin embargo, se observó diferencia estadística entre los diferentes niveles; el método de sal caliente en el nivel 1 (300 °C) destacó, proporcionando el valor más alto de esta característica ($10.12 \pm 0.86 \text{ cm}^3$). Contrariamente, al usar el mismo nivel en el método de microondas (3.77 W/g), se encontró el volumen más bajo ($6.23 \pm 0.26 \text{ cm}^3$).

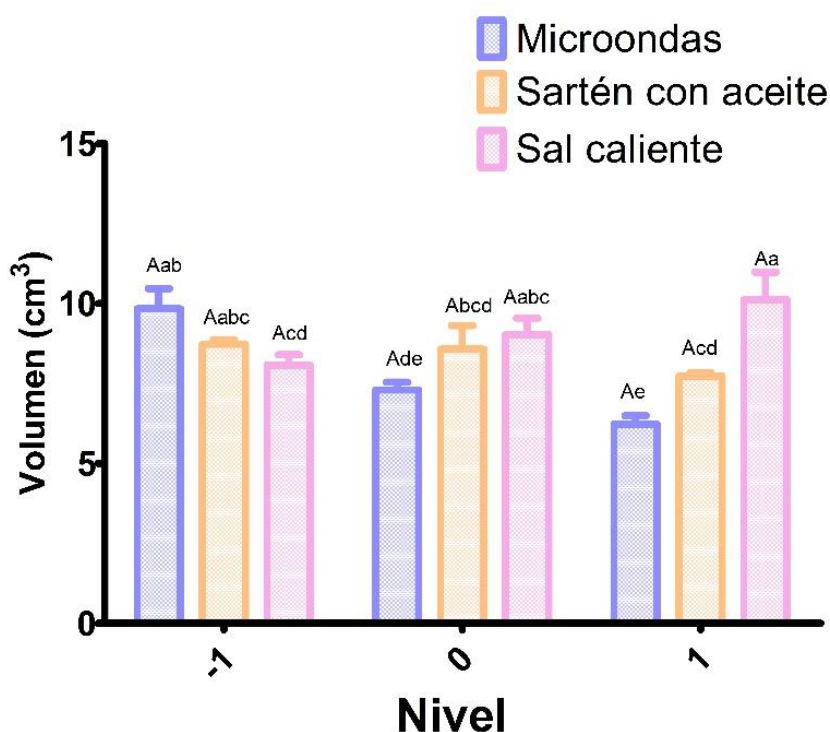


Figura 13. Efecto del método y condiciones de procesamiento en el volumen (cm^3) de explotados de sorgo.

Letras mayúsculas diferentes indican diferencias estadísticas entre métodos, letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticas entre niveles ($p < 0.05$).

Ya que las palomitas son una botana que se comercializa por volumen, esta característica es muy importante para su aceptación en el mercado. Previamente, [Llopart y Drago \(2016\)](#) evaluaron el volumen específico de explotados de sorgo obtenidos al utilizar la técnica de lecho fluidizado. Los autores llevaron a cabo el explotado del grano a 250 °C durante un minuto, ajustando diferentes condiciones para la humedad del grano: 14 % y 18 %.

Finalmente obtuvieron valores de volumen de $14.2 \pm 2.6 \text{ cm}^3$. Cabe destacar que este valor se encuentra por encima de lo encontrado en este estudio; sin embargo, los autores no mencionan el método utilizado para medir volumen, por lo que esta diferencia puede estar relacionada con el método empleado para evaluar el volumen y el método de explotado.

6.1.3 Desempeño de explotado

Respecto con las características de rendimiento se comenzó calculando el desempeño de explotado por parte del grano (Figura 14). Los datos mostraron diferencia estadística significativa ($p < 0.05$) entre los tres métodos. Sin embargo, entre sus respectivos niveles los resultados se mantuvieron estadísticamente iguales. En ese sentido, con el método de microondas se obtuvieron los desempeños de explotado más bajos, fluctuando entre $86.50 \pm 0.30 \%$ y $88.32 \pm 0.49 \%$. Mientras que, con el método de sal caliente se obtuvieron valores de desempeño de explotado más altos que con el método previamente mencionado ($89.60 \pm 0.55 \%$). Sin embargo, el método que proporcionó los mejores resultados para esta caracterización fue el de sartén con aceite. Este último método mostró una diferencia estadística significativa respecto a los dos métodos previamente mencionados. Con este método, el desempeño de explotado osciló entre $89.60 \pm 2.19 \%$ y $89.60 \pm 0.55 \%$.

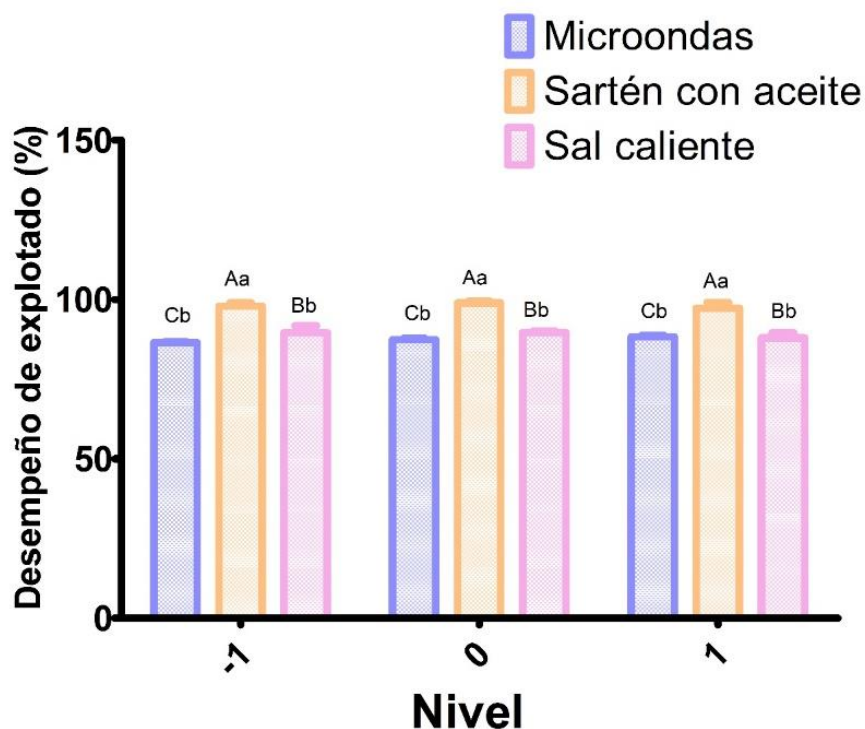


Figura 14. Efecto del método y condiciones de procesamiento en el desempeño de explotado (%) de sorgo.

Letras mayúsculas diferentes indican diferencias estadísticas entre métodos, letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticas entre niveles ($p < 0.05$).

Cabe mencionar que el valor obtenido en esta investigación es mayor al reportado por [Llopard y Drago \(2016\)](#) al explotar híbridos de sorgo blanco argentino y africano con 14 % y 18 % de humedad, utilizando un lecho fluidizado (250 °C, 60 s). Los autores obtuvieron resultados promedio de 83.00 ± 7.20 %.

6.1.4 Rendimiento del proceso

En la [Figura 15](#) se muestran los rendimientos obtenidos en diferentes tratamientos y condiciones de procesamiento a los que se sometieron los granos de sorgo. Con el método de microondas en el nivel 0 (3.51 W/g) se obtuvo el rendimiento más bajo (44.55 ± 2.57 %); sin embargo, este valor incrementa hasta 58.15 ± 2.86 % al llevar a cabo el proceso en el nivel -1 (3.15 W/g). Respecto al método de sartén con aceite no se observó diferencia estadística significativa entre los niveles -1 (200 °C) y 0 (215 °C), proporcionando el rendimiento más alto (69.21 ± 2.49 %). Finalmente, el nivel 1 (300 °C) proporcionó el mejor rendimiento para

método de sal caliente ($68.28 \pm 3.03\%$). Contrariamente, en el nivel -1 ($250\text{ }^{\circ}\text{C}$) del mismo se obtuvo el rendimiento más bajo ($48.90 \pm 3.86\%$). De forma general, los mejores rendimientos de proceso se obtuvieron con el método con el método de sartén con aceite.

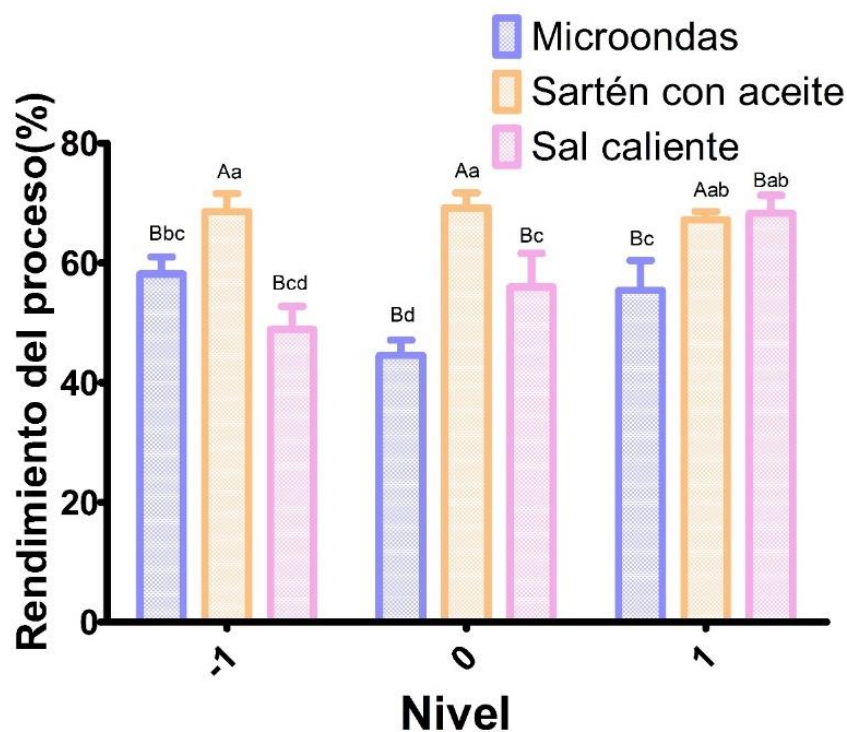


Figura 15. Efecto del método y condiciones de procesamiento en el rendimiento de proceso (%) de explotados de sorgo.

Letras mayúsculas diferentes indican diferencias estadísticas entre métodos, letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticas entre niveles ($p < 0.05$).

Mishra *et al.* (2015), reportan la obtención de $80.96 \pm 1.56\%$ para el rendimiento del proceso de explotado de sorgo rojo Mugad en microondas. Donde, el flujo de potencia utilizado fue de 18 Wg^{-1} . Este último podría ser el factor que genera diferencias con los resultados obtenidos en el presente estudio.

6.1.5 Microestructura de explotados de sorgo

La microestructura de los sorgos explotados mediante los diferentes tratamientos térmicos se muestra en la Figura 16. En forma general, se observó que la morfología del producto fue similar a un panal de abejas constituido por celdas poligonales con láminas delgadas. Castro-Campos *et al.* (2021) obtuvieron una microestructura similar al observar explotados de sorgo

obtenidos con el método de aire caliente. Según los autores, esta forma se obtiene como resultado de la fusión de los gránulos de almidón con los componentes no almidonados del sorgo.

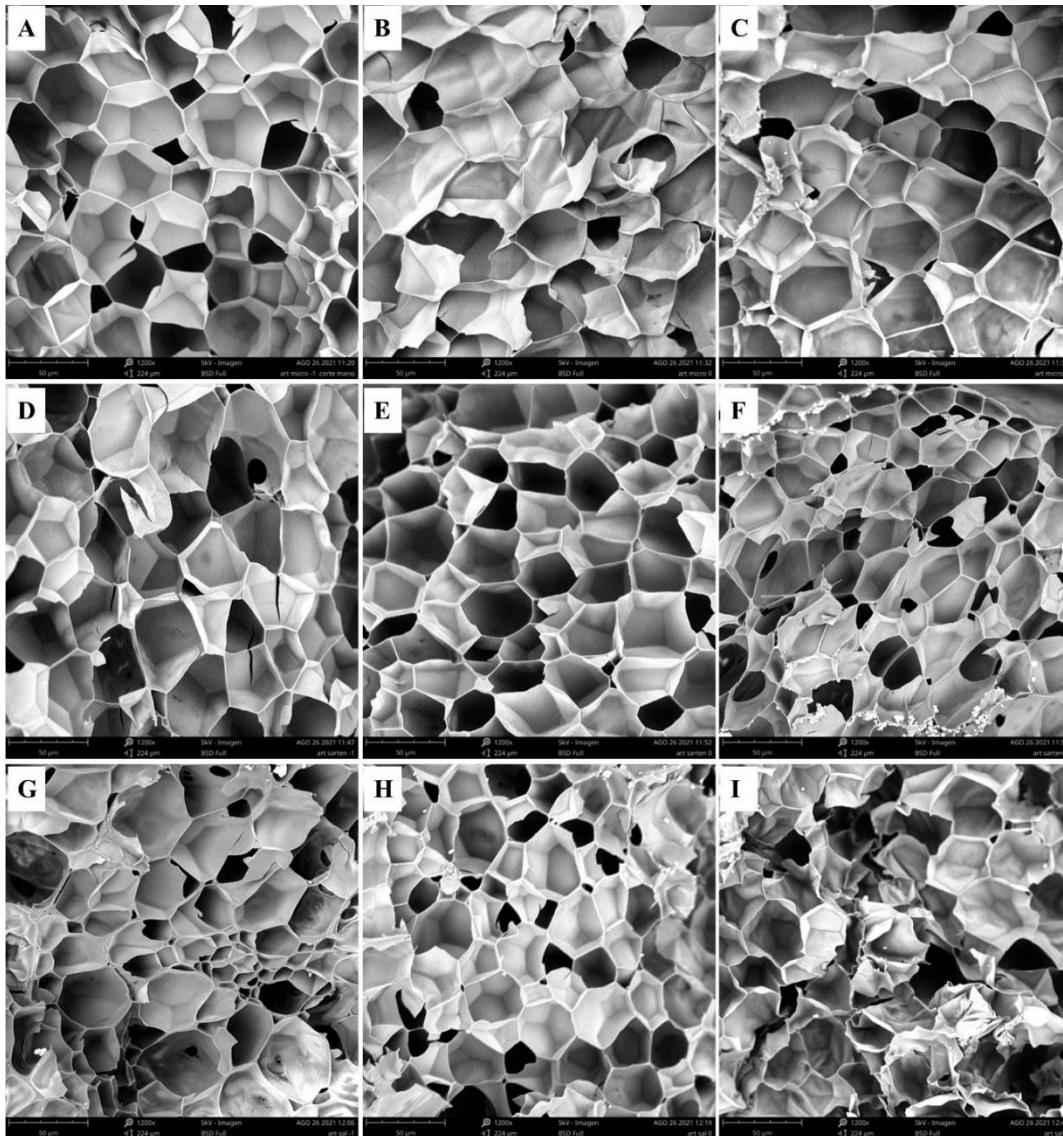


Figura 16. Microestructura de explotados de sorgo obtenidos mediante los diferentes métodos.

A: microondas -1; B: microondas 0; C: microondas 1; D: sartén con aceite -1; E: sartén con aceite 0; F: sartén con aceite 1; G: sal caliente -1; H: sal caliente 0; I: sal caliente 1.

En los explotados de sorgo obtenidos mediante microondas en el nivel 0 (3.51 W/g) (Figura 16B) se observó una microestructura dañada. Es decir, celdas con deformaciones y pérdida de la estructura hexagonal. Sin embargo, en los niveles -1 (3.15 W/g) y 1 (3.77 W/g) (Figura

16A y C) la forma de las celdas se homogeniza, y se son muy parecidas entre ambas. Para los explotados de sorgo obtenidos mediante sartén con aceite en el nivel 1 (230 °C) no se formó la estructura hexagonal homogénea, obteniendo una forma irregular (Figura 16F). Mientras que en los niveles -1 (200 °C) y 0 (215 °C) de este método (Figura 16D y E) la microestructura fue constituida por hexágonos con mejor forma. Finalmente, respecto a los explotados que se obtuvieron con el método de sal caliente se observó que en el nivel 1 (300 °C) (Figura 16I) la microestructura luce arruinada. El nivel 0 (275 °C) (Figura 16H) fue el que reveló una forma más regular y estética.

Tras observar los diferentes resultados y formas obtenidos se apreció que el nivel de temperatura o potencia al cual se lleva a cabo el proceso de explotado es un factor que afecta la formación de la microestructura del producto final. Con la finalidad de evaluar el impacto del tratamiento sobre el tamaño de celda se midió el tamaño de cada una de las mismas. Tras la evaluación se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre los resultados. Las celdas de las muestras se consideraron *chicas* cuando su tamaño fue menor a 34 μm , *medianas* cuando su tamaño osciló entre 39 y 45 μm , y *grandes* cuando fue mayor a 49 μm . En este sentido, los explotados obtenidos mediante el método de microondas en el nivel -1 (3.15 W/g) presentaron los tamaños de celda más grandes, con media de $53.63 \pm 3.44 \mu\text{m}$. En segundo lugar, se encontraron los explotados obtenidos en sartén con aceite en el nivel -1 (200 °C) y microondas en el nivel 0 (3.51 °C), con tamaños de celda de $49.93 \pm 3.28 \mu\text{m}$ y $49.58 \pm 3.14 \mu\text{m}$, respectivamente. Finalmente, el menor tamaño de celda se encontró en los explotados obtenidos en sartén con aceite en el nivel 1 (300 °C) ($33.1 \pm 2.93 \mu\text{m}$). Respecto al resto de los tratamientos, los tamaños de celda fueron intermedios a los rangos mencionados.

6.1.6 Análisis de perfil de textura

En el Cuadro 2 se presentan los resultados del análisis de perfil de textura obtenidos al evaluar los explotados de sorgo de los diferentes tratamientos. Para empezar se evaluó la dureza de los productos, la cual es una característica importante en los alimentos ya que es la primera impresión que tiene el consumidor al probar el producto (Hamouchene y Aoua 2014). En los explotados obtenidos con el método de sal caliente se obtuvieron los valores más bajos de esta característica: $1.79 \pm 0.19 \text{ N}$, en el nivel 0 (275 °C) y $2.23 \pm 0.15 \text{ N}$ en el nivel 1 (300

°C). Respecto a los explotados en sartén con aceite, la dureza media obtenida fue 4.64 ± 0.30 N, 3.71 ± 0.56 N y 3.20 ± 0.59 N en los niveles -1 (200 °C), 0 (215 °C) y 1 (230 °C), respectivamente. Finalmente, los explotados obtenidos en microondas tuvieron los valores más altos de dureza ($p < 0.05$) de todo el conjunto de datos, con resultados que oscilaron entre 5.21 ± 0.50 y 5.43 ± 0.39 N. Por lo tanto, los explotados obtenidos mediante sal caliente podrían ser los mejor aceptados al evaluar esta característica, ya que se requiere menos esfuerzo al ser comprimidos en la boca.

Cuadro 2. Análisis de perfil de textura

	Nivel	Dureza (N)	Cohesividad (adimensional)	Elasticidad (mm)	Masticabilidad (N)
<i>Microondas</i>	-1	2.44 ± 0.34^{Bb}	0.32 ± 0.01^{Aa}	0.16 ± 0.02^{Bb}	0.17 ± 0.05^{Ba}
	0	5.21 ± 0.50^{Aa}	0.33 ± 0.03^{Aa}	0.22 ± 0.03^{Bb}	0.26 ± 0.04^{Bb}
	1	5.43 ± 0.36^{Aa}	0.31 ± 0.006^{Aa}	0.32 ± 0.03^{Aa}	0.51 ± 0.03^{Aa}
<i>Sartén con aceite</i>	-1	4.64 ± 0.30^{Aa}	0.32 ± 0.02^{Aa}	0.22 ± 0.03^{Ba}	0.25 ± 0.03^{Ba}
	0	3.71 ± 0.56^{ABb}	0.22 ± 0.01^{Bb}	0.35 ± 0.03^{Aa}	0.63 ± 0.03^{Aa}
	1	3.20 ± 0.59^{Bb}	0.23 ± 0.01^{Bb}	0.41 ± 0.05^{Aa}	0.53 ± 0.13^{Aa}
<i>Sal caliente</i>	-1	4.70 ± 0.30^{Aa}	0.22 ± 0.01^{Ab}	0.13 ± 0.02^{Ab}	0.17 ± 0.03^{Aa}
	0	1.79 ± 0.19^{Bc}	0.22 ± 0.01^{Ab}	0.18 ± 0.04^{Ab}	0.18 ± 0.08^{Ab}
	1	2.23 ± 0.15^{Bb}	0.23 ± 0.01^{Ab}	0.18 ± 0.03^{Ab}	0.16 ± 0.03^{Ab}

Se muestra la media \pm desviación estándar de 10 experimentos independientes.

Letras mayúsculas diferentes dentro del mismo parámetro indican diferencia estadística ($p < 0.05$) entre niveles del mismo método. Letras minúsculas diferentes indican diferencia estadística ($p < 0.05$) entre métodos al mismo nivel.

Al evaluar la cohesividad de los explotados de sorgo se observó que en aquellos obtenidos mediante microondas en el nivel 0 (3.51 W/g) se tuvo el resultado más alto (0.33 ± 0.03). Este valor disminuyó al evaluar los explotados de sorgo obtenidos mediante sartén con aceite; con este método en los niveles 0 (215 °C) y 1 (230 °C) se obtuvieron los valores de 0.22 ± 0.01 y 0.23 ± 0.01 , respectivamente. En cuanto a los explotados obtenidos con sal caliente no se detectó diferencia estadística significativa ($p < 0.05$) entre los diferentes niveles del método con valores oscilando entre 0.22 y 0.23. Los valores más bajos de este parámetro indican una menor interacción entre los componentes del producto, dado que la cohesividad se asocia con la estabilidad de la matriz del producto (Hamouchene y Aoua 2014). En este sentido, los explotados obtenidos mediante sal caliente son menos duros y más frágiles, ya que la mayor cantidad de paredes celulares fueron rotas durante la primera compresión.

Para analizar la aptitud del explotado para recuperar su forma original después de la deformación se evaluó la elasticidad del producto. En los explotados obtenidos en

microondas los valores oscilaron entre 0.16 y 0.32 mm. Los valores más altos de todo el conjunto de datos se obtuvieron al caracterizar los explotados obtenidos en sartén con aceite. Dentro de este grupo se observaron diferencias estadísticas significativas, siendo el nivel 1 (230 °C) mediante el cual se obtuvo la elasticidad estadísticamente mayor (0.41 ± 0.05 mm). Respecto al método de sal caliente, en las elasticidades obtenidas en los niveles 0 (275 °C) y 1 (300 °C) no se observó diferencia estadística significativa ($p < 0.05$), con valores de 0.18 ± 0.04 mm y 0.18 ± 0.03 mm, respectivamente. Al llevar a cabo este proceso en el nivel -1 (250 °C) la elasticidad del producto disminuyó, reportando un valor de 0.13 ± 0.02 mm. De forma general, los valores de esta característica fueron bajos para todos los métodos, ya que el producto es sólido y sufre una deformación permanente después de la compresión.

Acerca de la masticabilidad, los valores estadísticamente más altos, se encontraron en los explotados obtenidos mediante los métodos de microondas y sartén con aceite. Respecto a los explotados de sorgo obtenidos con el método de sal caliente no se detectó diferencia estadística significativa ($p < 0.05$) entre niveles, ya que los valores oscilaron entre 0.16 y 0.18N. En comparación con los explotados obtenidos con microondas y sartén con aceite los valores de masticabilidad en los explotados con sal caliente más bajos y presentaron diferencias estadísticas. Estos valores indican que el trabajo necesario para masticar este producto es menor (Hamouchene y Aoua 2014). En este sentido, los explotados obtenidos con microondas y sartén con aceite se convierten en un producto más difícil de triturar.

6.2 Optimización del proceso

Dado que las palomitas o explotados son un producto que se comercializa por volumen esta característica es primordial, ya que la industria busca granos que produzcan un alto grado de expansión. Al analizar los resultados obtenidos en el presente estudio, es notable que los datos son mayores a los reportados en la literatura. Entre los cuales, se destacó el método de sal caliente, con volumen de 10.12 ± 0.86 g/cm³. Asimismo, el método mostró un rendimiento de 68.28 ± 3.03 % y un índice de expansión de 4.89 ± 0.33 . Además, las características texturales obtenidas reflejan un producto de fácil consumo, requiriendo poca fuerza para ser desintegrados hasta un estado que permita su ingesta.

Estas características convierten al método de sal caliente en un procedimiento prometedor. Por lo tanto, se realizó una optimización del proceso, con la finalidad de obtener los mejores

valores para las respuestas del mismo, teniendo así un producto final óptimo tras su exploración.

Para optimizar el método de explotado mediante sal caliente se analizó la información disponible acerca del proceso, es decir los experimentos preliminares obtenidos en la primera fase del proyecto. Con esta información se comenzó la exploración sobre las relaciones entre la variable respuesta de interés y los factores que se analizaron, permitiendo la planeación del experimento a llevar a cabo.

6.2.1 Diseño factorial 3^k

Se tuvo el supuesto de que la variable respuesta no era lineal, ni aproximadamente lineal en el rango de los factores estudiados. En este sentido, el primer paso fue llevar a cabo un diseño 3^k con la finalidad de encontrar y estudiar las interacciones de segundo orden en el modelo. Para llevar a cabo el proceso se seleccionaron 3 niveles codificados como -1, 0 y 1, para cada uno de los factores (humedad del grano y temperatura del proceso), cuyos niveles se muestran en el [Cuadro 3](#).

Cuadro 3. Niveles de las variables para el diseño factorial 3^k

Variable	-1	0	1
Humedad del grano (%)	11	16	21
Temperatura del proceso (°C)	260	275	290

Así, se tuvieron 3^2 diferentes tratamientos que correspondían a todas las posibles combinaciones de factores en los tres niveles de cada uno. En cada uno de los casos, los granos se explotaron durante 60 s, siguiendo la metodología de explotado mediante sal caliente (previamente estandarizada en la fase 1). Los experimentos se llevaron a cabo por triplicado.

Para el modelo estadístico del diseño se consideró el efecto individual de cada factor y de la interacción entre ambos. Las hipótesis se probaron con un análisis de varianza. Mediante el software estadístico RStudio® se creó el diseño factorial 3^k para el modelo ([Cuadro 4](#)), el cual indicó las combinaciones de los niveles en los factores mencionados. En esta fase, los experimentos indicados en el [Cuadro 4](#) se realizaron por triplicado para cada uno de los tratamientos.

Cuadro 4. Diseño factorial 3^k

Corrida experimental	Humedad del grano		Temperatura del proceso	
	Valor codificado	Valor real (%)	Valor codificado	Valor real (°C)
A	-1	11	-1	260
B	0	16	-1	260
C	1	21	-1	260
D	-1	11	0	275
E	0	16	0	275
F	1	21	0	275
G	-1	11	1	290
H	0	16	1	290
I	1	21	1	290

Posteriormente se caracterizaron las muestras en términos de su índice de expansión y rendimiento del proceso (Figura 17), dado que son las variables de interés por su importancia en el producto.

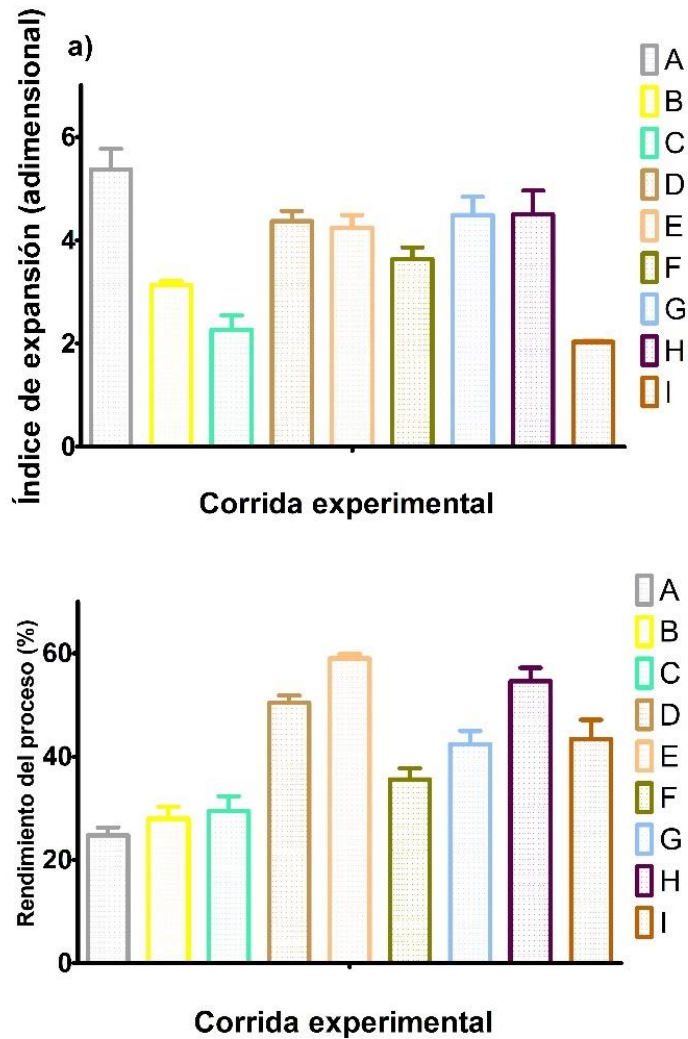


Figura 17. Caracterización de explotados

a) Índice de expansión; b) Rendimiento del proceso

Es posible observar la obtención de diferentes resultados entre las múltiples condiciones a los cuales sometieron los granos. Los resultados de ambas caracterizaciones se procesaron con ayuda del software estadístico RStudio®. A continuación, se presenta el análisis de los resultados obtenidos para el índice de expansión.

Se realizó el análisis de varianza con la finalidad de comparar y probar la hipótesis respecto a las varianzas entre las medias de los diferentes grupos.

Cuadro 5. Análisis de varianza para el diseño factorial 3^k del índice de expansión

	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr(>F)
CH	2	30.45	15.22	207.93	3.64e-13***
TP	2	0.07	0.04	0.50	0.6177
CH:TP	4	3.11	0.78	10.62	0.00013***
Residuos	18	1.32	0.07		

CH: Contenido de humedad; TP: Temperatura del proceso; L: efecto lineal; Q: efecto cuadrático.
Códigos de significancia: 0 ‘***’; 0.001 ‘**’; 0.01 ‘0’; 0.1 ‘ ‘

Asimismo, se obtuvieron los coeficientes lineales y cuadráticos de las variables.

Cuadro 6. Coeficientes de las variables independientes para índice de expansión

Intercepción	CH.L	CH.Q	TP.L	TP.Q	CH.L:TP.L	CH.Q:TP.L	CH.L:TP.Q	CH.Q:TP.Q
3.60	-1.76	-0.51	0.08	0.03	0.16	-0.91	-0.22	0.36

CH: Contenido de humedad; TP: Temperatura del proceso; L: efecto lineal; Q: efecto cuadrático

Al analizar los resultados obtenidos en el ANOVA del modelo, se observó la presencia de variables no significativas en el mismo. Debido a esto, se implementó un nuevo modelo lineal (Ecuación 16) para predecir la respuesta basándose en relaciones lineales entre la respuesta (índice de expansión) y los términos significativos considerando únicamente los términos significativos.

$$Y \sim CH+CH^2+CH^2:TP+CH^2:TP^2 \quad \text{Ecuación 16}$$

Considerando la Ecuación 16, se realizó el análisis de varianza del modelo para analizar la variación de la respuesta “índice de expansión” en razón de sus variables de entrada significativas.

Cuadro 7. Análisis de varianza para el diseño factorial 3^k del índice de expansión

	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr(>F)
CH	2	30.45	15.22	207.94	3.64e-13***
CH:TP	6	3.18	0.53	7.24	0.0004***
Residuos	18	1.32	0.07		

Los grados de libertad del modelo se muestran en la columna “GL”, los cuales fueron determinados por el número de datos contenidos en la muestra. Los datos contenidos en la columna suma de cuadrados representan variación de los múltiples datos evaluados en el

modelo; las sumas de cuadrados se dividieron entre sus respectivos grados de libertad. La varianza correspondiente a los términos se conoció tras el cálculo del cuadrado medio. Finalmente, para determinar si la variable se relacionó con la respuesta se llevó a cabo la prueba estadística del valor F. Asimismo, este valor permitió conocer qué tanta significancia tenía la variable en el modelo; entre mayor sea el valor F del término se contradice la hipótesis de que no provoca efectos en la respuesta (Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar 2012).

Gracias al análisis de varianza fue posible corroborar que el contenido de humedad y su interacción con la temperatura del proceso producen efectos significativos sobre la respuesta (índice de expansión).

Se realizó el cálculo de los coeficientes de las variables independientes para el índice de expansión (Cuadro 8), así como los residuos del modelo (Cuadro 9). Es decir, la parte de la respuesta que no está explicada dentro del modelo estimado.

Cuadro 8. Coeficientes de las variables independientes para índice de expansión

Intercepción	CH.L	CH.Q	CH-1:TP.L	CH0:TP.L	CH1:TP.L	CH-1:TP.Q	CH0:TP.Q	CH1:TP.Q
3.60	-1.76	-0.40	0.83	-0.17	0.32	-0.27	0.02	

Cuadro 9. Residuos

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.50	-0.13	0.01	0.09	0.40

Con el objetivo de evaluar y conocer cómo afectan las variables independientes, se descompusieron en 8 componentes con un grado de libertad. Así, se construyó un resumen del análisis de varianza, el cual se muestra en la Cuadro 10.

Cuadro 10. Resumen del modelo para el análisis de varianza del índice de expansión

Coeficientes	Estimado	Error estándar	Valor t	Pr(> t)
Intercepción	3.60	0.05	69.15	<2e-16***
CH.L	-1.77	0.09	-19.58	1.39e-13***
CH.Q	-0.51	0.09	-5.70	2.13e-05***
CH-1:TP.L	-0.40	0.16	-2.57	0.02*
CH0:TP.L	0.83	0.16	5.33	4.60e-05***
CH1:TP.L	-0.17	0.16	-1.12	0.28
CH-1:TP.Q	0.33	0.16	2.09	0.05.
CH0:TP.Q	-0.27	0.16	-1.70	0.11
CH1:TP.Q	0.02	0.16	0.12	0.90

Error estándar residual: 0.27 con 18 grados de libertad.
R-cuadrada múltiple: 0.96, r-cuadrada ajustada: 0.95
F-estadística: 57.42 con 8 y 18 GL, valor p: 3.05e-11

CH: Contenido de humedad; TP: Temperatura del proceso; L: efecto lineal; Q: efecto cuadrático.
Códigos de significancia: 0 ‘***’; 0.01 ‘*’, 0.05 ‘.’

En este punto fue posible observar los términos que afectan de forma significativa a la respuesta. En este sentido, el efecto lineal y el efecto cuadrático del contenido de humedad influyen en el modelo con un nivel de significancia menor al 0.001%. Con este nivel de significancia, también se aprecia el efecto significativo de la interacción entre el contenido de humedad (nivel 0) y la temperatura del proceso (lineal).

Por otro lado, cuando el contenido de humedad (nivel -1) interactúa con la temperatura del proceso en su forma lineal, producen efectos significativos en el modelo con el nivel de significancia de 0.01%. Finalmente, la interacción entre el contenido de humedad (nivel -1) y la temperatura del proceso en su forma cuadrática afectan a la respuesta en un nivel de significancia de 0.05%.

Se analizó el valor del coeficiente de determinación (R^2) para determinar qué tan bien se ajusta el modelo a los datos, así como el de R^2 ajustada para conocer el grado de efectividad que tienen las variables independientes en explicar la variable dependiente (Palma 2022). Mediante el valor de R^2 se conoció el porcentaje de la variación en la variable de respuesta. Este valor es 96%, lo cual indica que el modelo se ajusta de buena forma a los datos. Respecto a R^2 ajustada, el valor obtenido fue de 95%, por lo tanto, es posible decir que existe un alto grado de efectividad de parte de las variables para explicar la respuesta.

El nivel de significancia de la F-estadística del modelo indica que la relación entre el modelo y las variables involucradas es estadísticamente significativa. Por su parte, el valor p corrobora este dato, es decir, que asociación entre variables es estadísticamente significativa

El mismo procedimiento se llevó a cabo para evaluar los resultados obtenidos respecto al rendimiento del proceso.

En primera instancia, se realizó el análisis de varianza para el rendimiento del proceso, el cual se muestra en el Cuadro 11. El cual, muestra los efectos del contenido de humedad, temperatura del proceso y su interacción de manera global. No se especifican las influencias lineales ni cuadráticas. Asimismo, se realizó el cálculo de los coeficientes de las variables independientes del modelo (Cuadro 12).

Cuadro 11. Análisis de varianza para el diseño factorial 3^k del rendimiento del proceso

	Df	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr(>F)
CH	2	232.43	116.22	17.25	6.54e-05***
TP	2	2865.91	1432.95	212.70	2.99e-13***
CH:TP	4	313.18	78.30	11.62	7.70e-05***
Residuos	18	121.26	6.74		

CH: Contenido de humedad; TP: Temperatura del proceso; L: efecto lineal; Q: efecto cuadrático.
Códigos de significancia: 0 '***'.

Cuadro 12. Coeficientes de las variables independientes para rendimiento del proceso

Intercepción	CH.L	CH.Q	TP.L	TP.Q	CH.L:TP.L	CH.Q:TP.L	CH.L:TP.Q	CH.Q:TP.Q
40.97	-0.39	-5.07	14.34	-10.62	-11.85	-7.80	5.83	2.47

CH: Contenido de humedad; TP: Temperatura del proceso; L: efecto lineal; Q: efecto cuadrático

Para el análisis de varianza, se calculó la suma de los cuadrados de las diferencias con respecto a la media. Después, dividiendo la suma de los cuadrados del error residual entre los grados de libertad, se obtuvo la variación dentro de las muestras, la cual es representada por el cuadrado medio (Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar 2012).

El cociente entre varianzas para evaluar la significancia del término en el modelo de regresión se observa en el valor F. Tras el análisis de datos se observó que, para el rendimiento del proceso, el contenido de humedad del grano, la temperatura del proceso y su interacción son significativos a un nivel de significancia menor al 0.001%.

Asimismo, se consideró el cálculo de los residuos o errores del modelo (**Cuadro 13**), los cuales representan las distancias entre los puntos que representan los datos y el modelo (Vera Candiotti et al. 2014).

Cuadro 13. Residuos

Min	1Q	Median	3Q	Max
-4.46	-1.47	0.03	1.74	4.25

Nuevamente se analizó el resumen del análisis de varianza (**Cuadro 14**) para conocer de forma detallada cómo interactuaban las variables de entrada, desglosándolas en sus componentes lineal y cuadrático.

Cuadro 14. Resumen del análisis de varianza para el diseño factorial 3^k del rendimiento del proceso

Coeficientes	Estimado	Error estándar	Valor t	Pr(> t)
Intercepción	40.97	0.50	82.03	<2e-16***
CH.L	-0.39	0.87	-0.45	0.661
CH.Q	-5.06	0.87	-5.86	1.51e-05***
TP.L	14.34	0.87	16.58	2.40e-12***
TP.Q	-10.62	0.87	-12.27	3.50e-10***
CH.L:TP.L	-1.85	1.50	-1.24	0.2324
CH.Q:TP.L	-7.80	1.50	-5.21	5.95e-05***
CH.L:TP.Q	5.83	1.50	3.89	0.0010
CH.Q:TP.Q	2.47	1.50	1.65	0.1165

Error estándar residual: 2.596 con 18 grados de libertad.
R-cuadrada múltiple: 0.97, r-cuadrada ajustada: 0.95
F-estadística: 63.3 con 8 y 18 GL, valor p: 1.32e-11

CH: Contenido de humedad; TP: Temperatura del proceso; L: efecto lineal; Q: efecto cuadrático.
Códigos de significancia: 0 '***'; 0.001 '**'; 0.01 '0'; 0.1 ' '.

En esta ocasión, la temperatura del proceso en sus efectos lineal y cuadrático, el contenido de humedad en su forma cuadrática, así como y la intersección del efecto cuadrático del contenido de humedad con la temperatura del proceso tuvieron efectos significativos sobre la respuesta.

El valor del coeficiente de determinación (R^2) obtenido es de 97%, el cual refleja una gran fuerza de relación entre el modelo y la variable de respuesta, así como fiabilidad por parte del modelo. El coeficiente R^2 ajustada, indicó que las variables explican la respuesta de forma

precisa (Palma 2022; Vera Candiotti et al. 2014). Asimismo, los valores de F-estadística y valor p tienen significancia estadística, por lo que se puede decir que el modelo brinda un buen ajuste (GilPavas et al. 2014).

6.3.2 Diseño central compuesto

Una vez determinados los efectos cuadráticos significativos para las dos respuestas de interés gracias al análisis de los resultados obtenidos en el diseño factorial 3^k , se optó por explorar detalladamente la región experimental mediante la metodología de superficie de respuesta; lo anterior con la finalidad de encontrar las condiciones de operación del proceso que brinden el valor óptimo de las características de calidad de interés: índice de expansión y rendimiento del proceso.

En esta nueva etapa de búsqueda de segundo orden se utilizó un diseño central compuesto, el cual se constituyó por n_0 puntos al centro del diseño y dos puntos axiales sobre cada eje a una distancia α del origen. Se seleccionaron los nuevos niveles a explorar para cada una de las variables (Cuadro 15).

Cuadro 15. Niveles de exploración en unidades originales

Nivel	-1	0	1
Humedad del grano (%)	11	16	21
Temperatura del proceso (°C)	240	275	310

Con ayuda del software estadístico JMP Pro 14® se modeló un diseño central compuesto rotatorio (Cuadro 16), con la finalidad de tener una varianza de predicción constante en todos los puntos equidistantes al centro del proceso, donde $\alpha=(F)^{1/4}$. El explotado mediante sal caliente se llevó a cabo siguiendo la metodología previamente mencionada.

Cuadro 16. Diseño central compuesto en unidades codificadas y originales

Corrida	CH	TP	CH (%)	TP (°C)	Bloque	Índice de expansión	Rendimiento del proceso
	Unidades codificadas		Valor real				
0a	0	-1.41	16	225.50	1	1.65	7.95
0A	0	1.41	16	324.50	1	4.91	46.74
-+	-1	1	11	310	1	4.68	33.41
+-	1	-1	21	240	1	1.66	12.92
a0	-1.41	0	8.93	275	1	3.79	8.80
++	1	1	21	310	1	2.56	38.28
--	-1	-1	11	240	1	1.33	5.30
A0	1.41	0	23.07	275	2	2.96	21.16
00	0	0	16	275	2	4.50	59.25
00	0	0	16	275	2	4.00	59.66

CH: Contenido de humedad; TP: Temperatura del proceso

Una vez obtenidos los datos correspondientes a las corridas experimentales mostradas en el cuadro 16, se realizó el ajuste por mínimos cuadrados y se estimaron los coeficientes de los parámetros (Cuadro 17).

Cuadro 17. Estimaciones de los parámetros

Término	Estimación	Error Estándar	Razón T	Prob> t
Constante del modelo	4.25	0.41	10.25	0.0005*
Humedad	-0.37	0.21	-1.79	0.15
Temperatura	1.11	0.21	5.34	0.006*
Humedad*temperatura	-0.61	0.29	-2.09	0.10
Humedad*humedad	-0.63	0.27	-2.30	0.08
Temperatura*temperatura	-0.68	0.27	-2.47	0.07

Nivel de significancia: * $\alpha=5\%$

Los resultados del análisis mostraron que existen cinco efectos lineales y cuadráticos para la respuesta. En este sentido, el contenido de humedad (x_1) afecta a la variable a un nivel de confianza del 95%.

Posteriormente, la significancia y ajuste de modelo se realizó el análisis de varianza. Los resultados se muestran en el Cuadro 18.

Cuadro 18. Análisis de varianza del DCC para índice de expansión

	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr(>F)
Modelo	5	15.15	3.03	8.82	0.0278*
Error	4	1.37	0.34		
C. Total	9	16.53			
Falta de ajuste	3	1.25	0.42	3.29	0.37
Error puro	1	1.24	0.13		
Error total	4	1.37			

Nivel de significancia: * $\alpha=5\%$.

Los resultados del ANOVA mostraron que el modelo es significativo con $\alpha=5\%$. Los valores de cuadrado medio representan la variación entre las medias de los componentes del modelo. También, se apreció que la falta de ajuste del modelo no es significativa, lo cual es posible comprobar en la [Figura 18](#).

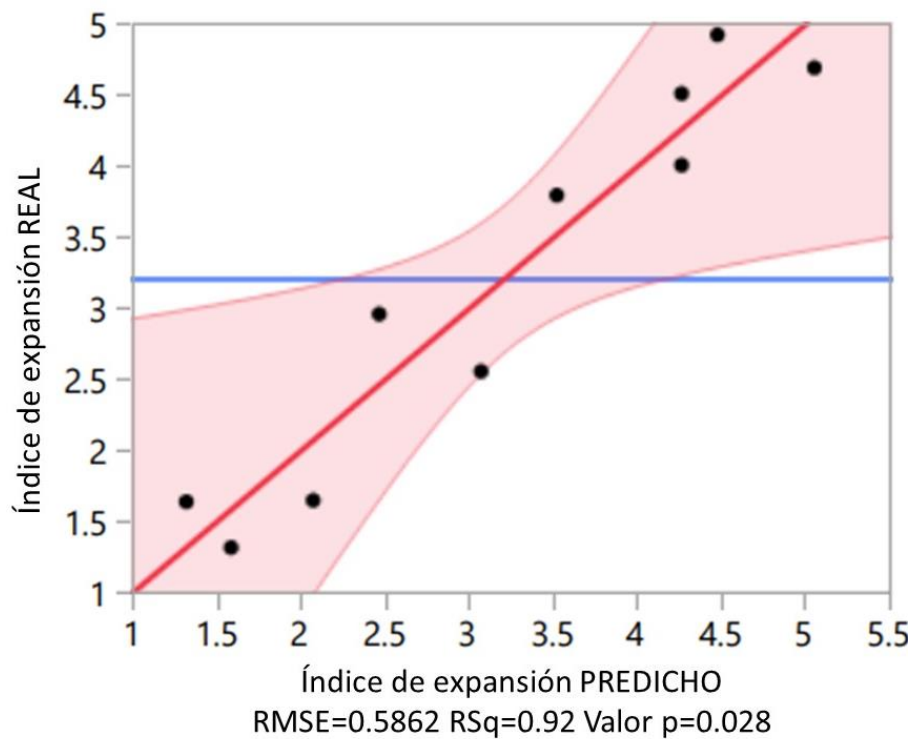


Figura 18. Ajuste de los datos al modelo de superficie de respuesta para el índice de expansión.

En el resumen del ajuste, se aprecia un valor del coeficiente de determinación (R^2) alto, por lo tanto, se considera que el ajuste del modelo es válido y que la ecuación obtenida representa adecuadamente la relación cuantitativa de las variables.

Cuadro 19. Resumen del ajuste para índice de expansión

R ²	0.92
R ² ajustada	0.81
Raíz del error cuadrático medio	0.58

El valor de R² ajustada es de 81%, el cual indica una representación adecuada de la relación cuantitativa de las variables. Con el cálculo de la raíz del error cuadrático se compararon los valores predichos por el modelo con los valores experimentales. En este sentido, es posible decir que no existe diferencia significativa entre ambos grupos de datos, ya los valores bajos de este dato indican un buen ajuste de precisión (Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar 2012).

Finalmente se desarrolló la Ecuación 17 de predicción para el índice de expansión.

$$Y = 4.25 + (-)0.37 \left(\frac{X_1 - 16}{5} \right) + 1.11 \left(\frac{X_2 - 275}{35} \right) + \left(\frac{X_1 - 16}{5} \right) \left(\left(\frac{X_2 - 275}{35} \right) * (-)0.61 \right) + \left(\frac{X_1 - 16}{5} \right) \left(\left(\frac{X_1 - 16}{5} \right) * (-)0.63 \right) + \left(\frac{X_2 - 275}{35} \right) \left(\left(\frac{X_2 - 275}{35} \right) * (-)0.68 \right) \text{ Ecuación 17}$$

Donde, Y: índice de expansión; X₁: Contenido de humedad; X₂: Temperatura del proceso.

Este procedimiento de análisis de datos se llevó a cabo para el modelo del rendimiento del proceso. Como primer paso, se estimaron los coeficientes de las constantes del modelo (Cuadro 20).

Cuadro 20. Estimaciones de los parámetros para el rendimiento del proceso

	Estimado	Error estándar	Razón t	Pr(> t)
Constante del modelo	59.45	0.93	64.04	<0.0001*
x1	3.75	0.46	8.07	0.0013*
x2	13.54	0.46	29.17	<0.0001*
x1:x2	-0.68	0.66	-1.05	0.3541
x1 ²	-21.91	0.61	-35068	<0.0001*
x2 ²	-15.73	0.61	-25.61	<0.0001*

Nivel de significancia: * α=5%.

Se desarrolló el análisis de varianza del diseño central compuesto para la respuesta rendimiento del proceso (Cuadro 21).

Cuadro 21. Análisis de varianza del DCC para el rendimiento del proceso

	GL	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	Valor F	Pr(>F)
Modelo	5	4000.14	800.02	464.11	<0.0001*
Error	4	6.90	1.72		
C. Total	9	4007.03			
Falta de ajuste	3	6.81	2.27	27.01	0.14
Error puro	1	0.08	0.08		
Error total	4	6.90			

*Nivel de significancia: * $\alpha=5\%$.*

Es posible observar que el modelo es significativo a un nivel de significancia de 5%. Por otro lado, el error del modelo no presentó significancia estadística. Por lo tanto, es posible decir que el modelo es válido.

Al analizar el resumen del ajuste (**Cuadro 22**), se encontró que el valor del coeficiente de determinación (R^2) es de 0.99, y es posible considerar que el ajuste del modelo es válido. El coeficiente de R^2 ajustada, permite decir que el modelo representa adecuadamente la relación cuantitativa entre las variables. Finalmente, el valor de la raíz del error cuadrático medio indica que los valores predichos por el modelo y los obtenidos durante la experimentación son cercanos, es decir, que existe poco error entre ellos.

Cuadro 22. Resumen del ajuste

R^2	0.998
R^2 ajustada	0.996
Raíz del error cuadrático medio	131

Tras analizar el ajuste del modelo, es posible decir que este explica de forma precisa de la varianza de los datos y los puntos de los datos se acercan más a la línea de regresión ajustada (**Figura 19**).

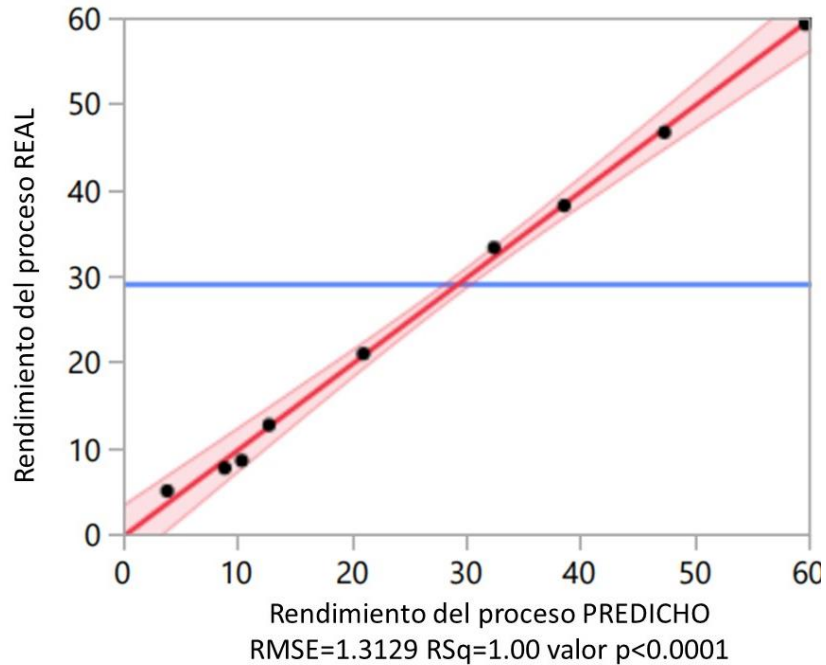


Figura 19. Ajuste de los datos al modelo de superficie de respuesta para el rendimiento del proceso.

Finalmente se desarrolló la ecuación de predicción (Ecuación 18). Gracias al análisis del modelo, es posible decir que representa adecuadamente la relación de las variables.

$$Y = 59.45 + 3.75 \left(\frac{X_1 - 16}{5} \right) + 13.54 \left(\frac{X_2 - 275}{35} \right) + \left(\frac{X_1 - 16}{5} \right) \left(\left(\frac{X_2 - 275}{35} \right) * (-)0.69 \right) + \left(\frac{X_1 - 16}{5} \right) \left(\left(\frac{X_1 - 16}{5} \right) * (-)21.91 \right) + \left(\left(\frac{X_2 - 275}{35} \right) * \left(\frac{X_2 - 275}{35} \right) * (-)15.73 \right) \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde, Y: rendimiento del proceso; X₁: contenido de humedad; X₂: temperatura del proceso.

De forma general, mediante el análisis de varianza se encontró que ambos modelos tuvieron significancia estadística y reflejan correctamente el comportamiento de las variables evaluadas.

Se modelaron las gráficas de superficie de respuesta para las variables dependientes con la finalidad de conocer el punto estacionario de los factores; es decir, el lugar donde el plano es tangente a la superficie y la pendiente es igual a cero. Este punto es el candidato al valor óptimo de respuesta.

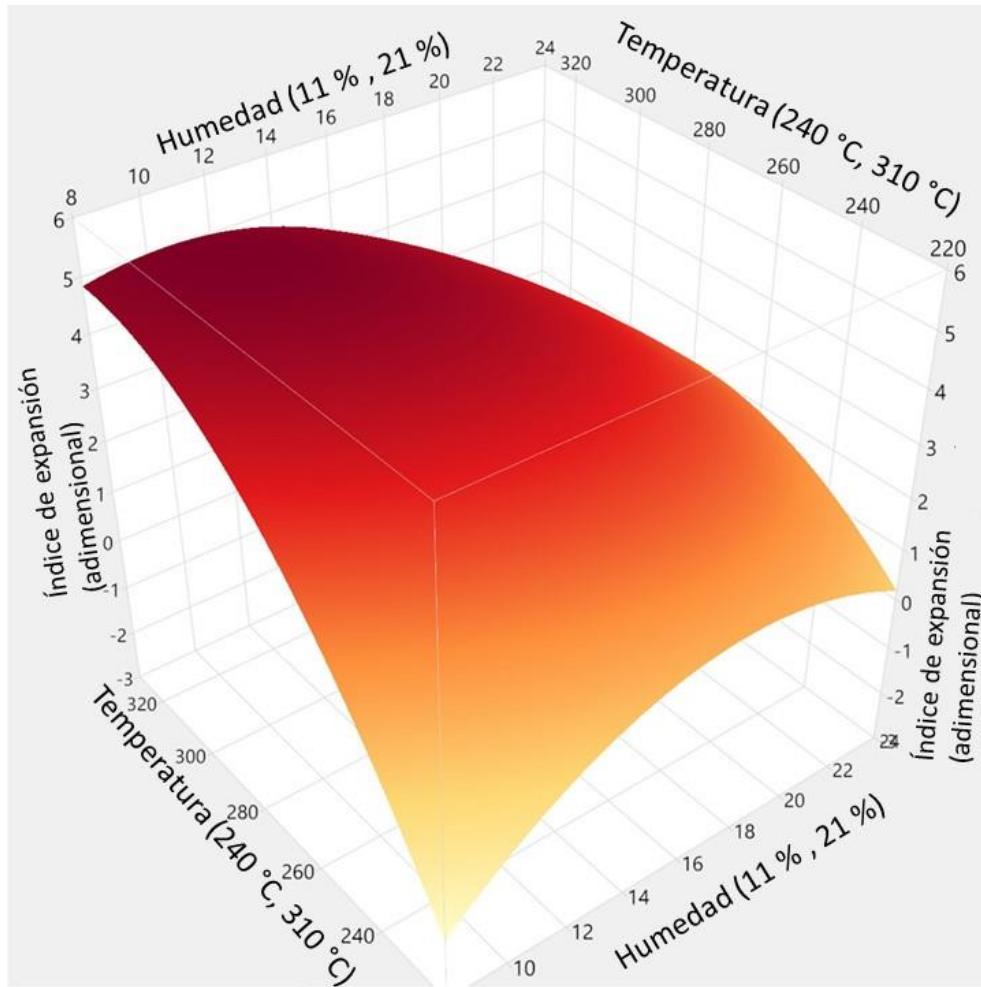


Figura 20. Superficie de respuesta para índice de expansión.

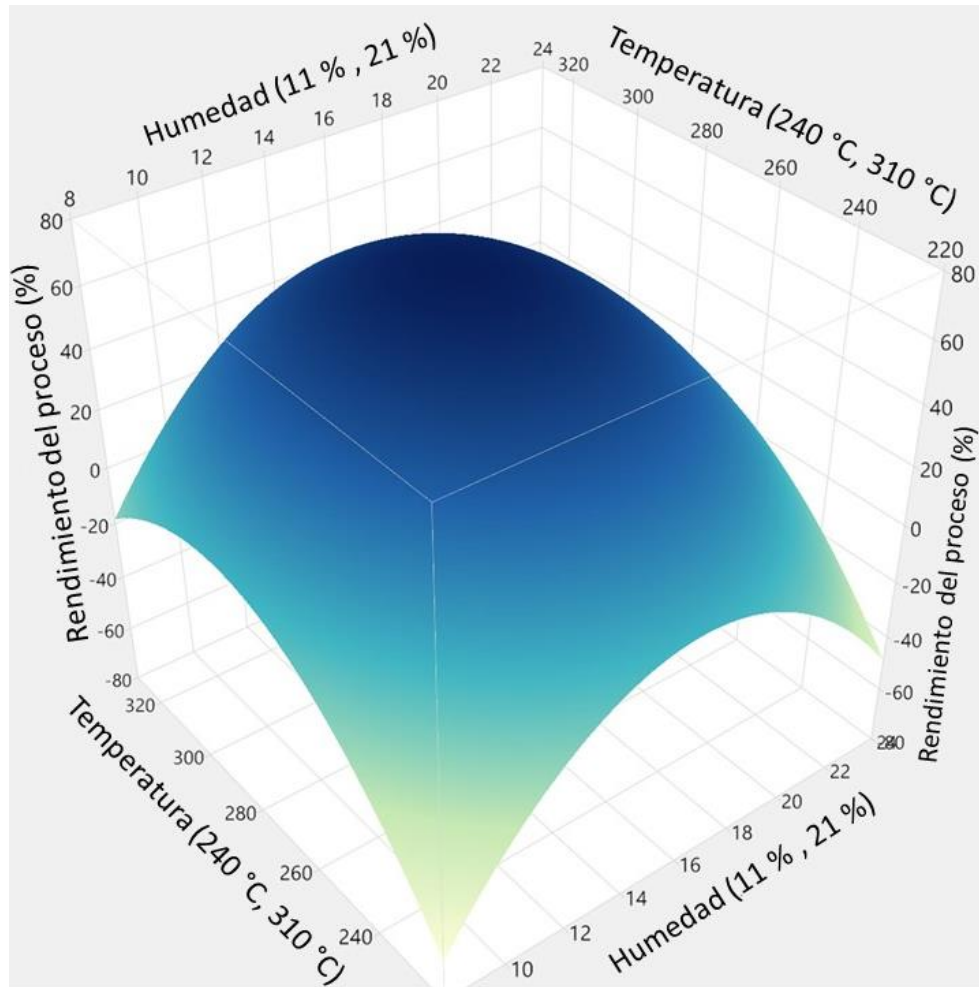


Figura 21. Superficie de respuesta para rendimiento del proceso.

El efecto cuadrático de las variables sobre la respuesta causó la estimación de la superficie, la cual se puede apreciar en la curvatura de las gráficas. La gráfica de contornos facilitó la visualización de la forma de la superficie. En la superficie, las curvas representan los niveles de los factores y cada una representa un valor específico de la altura de la superficie (Y). Por otro lado, la gráfica de superficie de respuesta permitió observar de forma tridimensional cómo se relacionaron los valores de respuesta a las variables continuas.

Se observó que, para obtener la mejor respuesta de índice de expansión, el punto estacionario se encontraba en una humedad de 12.62% y temperatura de 310 °C. Por otro lado, el punto estacionario para obtener el mejor rendimiento del proceso se encontró con una humedad de 16.42 % y temperatura del proceso de 278.31 °C. Sin embargo, se buscaba encontrar el punto que proporcionara la respuesta óptima para ambas variables.

En este sentido, se utilizó la función D-óptima del modelo al 95 % de confianza. mediante la cual, se minimizó la varianza generalizada de los parámetros estimados del modelo y se aumentó la deseabilidad. Gracias a esta función el perfilador de predicción proporcionó los valores óptimos del contenido de humedad del grano y temperatura del proceso para encontrar la mejor respuesta respecto al índice de expansión y rendimiento del proceso.

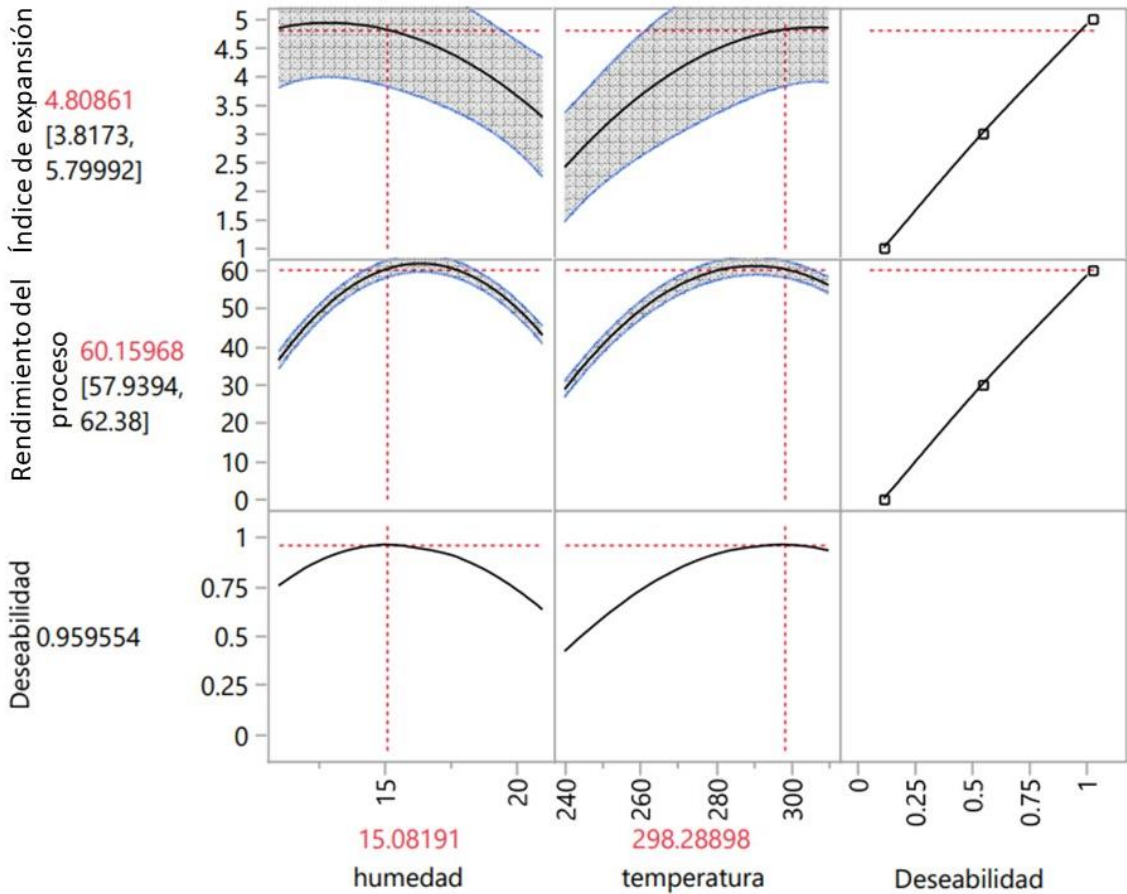


Figura 22. Perfilador de predicción para las variables independientes del explotado de sorgo usando sal.

Según el diseño D-óptimo, los valores de entrada que permitirían tener la mejor respuesta para el producto eran 15 % de humedad y 298 °C para la temperatura del proceso. Con la finalidad de comprobar estos datos se realizó nuevamente el explotado mediante sal caliente, ajustando las variables a lo predicho por el modelo. El procedimiento se llevó a cabo por triplicado y se realizó la caracterización de las muestras.

Cuadro 23. Índice de explotado y rendimiento del proceso de los explotados de sorgo optimizados

	Índice de expansión (adimensional)	Rendimiento del proceso (%)
Datos teóricos	4.80 ± 0.99	60.16 ± 2.22
Datos experimentales	5.29 ± 0.40	65.42 ± 3.70

Se muestra la media ± desviación estándar de 3 experimentos independientes.

En el Cuadro 23 es posible observar que se obtuvieron valores deseados para ambas variables. Los resultados experimentales se compararon con los datos teóricos mediante una prueba T de Student, con la finalidad de comprobar las medias de ambos conjuntos de datos y determinar similitudes. Con ayuda del software estadístico RStudio® se procesaron los resultados de índice de expansión y rendimiento del proceso.

Al llevar a cabo la prueba T de Student se tuvieron dos supuestos:

Hipótesis nula: las medias son iguales ($H_0: \mu_1 = \mu_2$).

Hipótesis alterna: Las medias no son iguales ($H_A: \mu_1 \neq \mu_2$).

Para el índice de expansión se obtuvo un valor t de 2.07 y un valor p=0.17, el cual es mayor que el nivel de significancia ($\alpha=0.05$). Dado que $p > \alpha$ se acepta la hipótesis nula: $H_0: \mu = 4.80$, ya que no existe evidencia para concluir que las medias son estadísticamente diferentes. El intervalo de confianza al 95% fue de (4.27, 6.32).

Para el rendimiento del proceso se repitió el procedimiento, calculando de nuevo la T de Student para comparar los datos experimentales y reales. En esta ocasión, la T de Student tuvo un valor de $t = 2.46$, y valor p de 0.13. Al ser mayor que el nivel de significancia de 0.05 nuevamente se aceptó la hipótesis nula $H_1: \mu = 60.18$, ya que no existe diferencia estadística significativa entre medias.

Para el intervalo de confianza del 95%, los valores que se obtuvieron son (56.24, 74.59). Se puede comprobar que, mediante el diseño central compuesto, la dirección de la optimización es hacia el incremento de la temperatura del proceso.

Tras llevar a cabo la comparación de medias, se observó que los resultados obtenidos en la fase experimental del proyecto coinciden con los resultados teóricos explorados previamente.

Por lo tanto, el diseño puede ser utilizado para predecir el comportamiento del modelo, al tener como variables respuesta el índice de expansión y rendimiento del proceso.

7. Conclusiones

En el presente trabajo se realizó la determinación de las condiciones óptimas de producción de explotados de sorgo. Para ello, se empleó la metodología de superficie de respuesta como herramienta de optimización, determinando el efecto de las variables de entrada sobre las respuestas de interés: índice de expansión y rendimiento del proceso.

En primera instancia, se comprobó que el método y condiciones de explotado producen cambios en la microestructura, perfil de textura, rendimiento y características volumétricas del producto final (explotados de sorgo). Asimismo, se observó que temperatura del proceso y el contenido de humedad del grano afectan al rendimiento y las características volumétricas del explotado.

Por otro lado, se demostró que el modelado estadístico permite predecir el valor de las variables respuesta de interés (índice de expansión y rendimiento del proceso). En este sentido, el diseño central compuesto en los experimentos secuenciales permitió estimar eficientemente las respuestas de interés (índice de expansión y rendimiento del proceso), y crear un modelo con una varianza de predicción constante.

Gracias al uso de la función de deseabilidad, fue posible optimizar el conjunto de variables respuesta, siendo estas 15 % de humedad del grano y temperatura del proceso de 298 °C. Tras realizar el proceso de explotado bajo las condiciones establecidas por el modelo, se comprobó que el modelo de predicción es preciso, dado que no existe diferencia estadística significativa ($p < 0.05$) entre los resultados teóricos y los resultados obtenidos experimentalmente.

Los resultados del proyecto permiten decir que las condiciones propuestas por el modelo (humedad 15%; temperatura 298 °C), representan un proceso óptimo de forma precisa ($\alpha = 0.05$), generando los mejores resultados de índice de expansión y rendimiento del proceso de obtención de explotados de sorgo utilizando el método de sal caliente.

Finalmente, los resultados ayudarán a crear alternativas saludables y de alta calidad que pueden implementarse a nivel industrial. Así mismo, al construir una sinergia, sería posible apoyar algunos problemas de inequidad económica a personas dedicadas al campo y producción del sorgo. Esto contribuirá a los objetivos de desarrollo sostenible, en particular

aquellos relacionados con salud y bienestar, trabajo decente y crecimiento económico, así como producción y consumo responsables.

La comercialización de esta innovación tendrá utilidad en el desarrollo económico del país, considerando la inclusión de amplios sectores, y contribuyendo a la resolución de problemas actuales. Tamaulipas, Guanajuato y Sinaloa son algunos de los estados en los cuales el incremento de siembra del grano de sorgo podría contribuir al progreso mencionado. Los cuales, actualmente representan el porcentaje de producción más importante en México (SIAP 2021). Al acrecentar la siembra, la producción de sorgo no sólo logrará abastecer las necesidades de consumo nacionales, sino que será posible aumentar la tasa de exportación del producto.

Gracias a las propiedades de ser un cereal sin gluten con alto contenido proteico, el sorgo se convierte en un producto saludable atractivo para gran parte de la población. Además de su bajo costo. En este sentido, fomentar la comercialización del grano es una muy buena opción, gracias a su capacidad de desarrollo en diferentes sectores del mercado.

Referencias

- Del Angel Sánchez, María Teresa, Pedro García-Alamilla, Laura Mercedes Lagunes-Gálvez, Ricardo García-alamilla, Eduardo Gregorio Cabrera Culebro, Laura Mercedes Lagunes-Galvez, Ricardo García-alamilla, y Eduardo Gregorio Cabrera-Culebro. 2015. “Aplicación de Metodología de Superficie de Respuesta para la Degradación de Naranja de Metilo con TiO₂ SOL-GEL Sulfatado”. *Revista internacional de contaminación ambiental* 31(1):99–106.
- Aruna, C., M. Suguna, K. B. R. S. Visarada, C. Deepika, C. V. Ratnavathi, y V. A. Tonapi. 2020. “Identification of sorghum genotypes suitable for specific end uses: Semolina recovery and popping”. *Journal of Cereal Science* 93:1–8. doi: 10.1016/j.jcs.2020.102955.
- Ba, Deniz, y Ismail H. Boyaci. 2007. “Modeling and optimization i: Usability of response surface methodology”. *Journal of Food Engineering* 78(3):836–45. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.11.024.
- Bayomy, Hala. 2017. “Sensory, Nutritional and Popping Qualities of Yellow and Purple Popcorn.” *Journal of Food and Dairy Sciences* 8(8):361–67. doi: 10.21608/jfds.2017.38903.
- Cabrera-Ramírez, A. H., F. G. Castro-Campos, M. Gaytán-Martínez, y E. Morales-Sánchez. 2020. “Relationship between the corneous and floury endosperm content and the popped sorghum quality”. *Journal of Cereal Science* 95(March):102999. doi: 10.1016/j.jcs.2020.102999.
- Cabrera-Ramírez, Ángel Humberto. 2015. “Efecto de la cocción térmico alcalina sobre los factores antinutricios y nutricios presentes en dos variedades de Sorgo (*Sorghum Bicolor* L. Moench)”.
- Castro-Campos, F. G., A. H. Cabrera-Ramírez, Eduardo Morales-Sánchez, M. E. Rodríguez-García, Mar Villamiel, Miguel Ramos-López, y Marcela Gaytán-Martínez. 2021. “Impact of the popping process on the structural and thermal properties of sorghum grains (*Sorghum bicolor* L. Moench)”. *Food Chemistry* 348:129092. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.129092.

- Chandrasekaran, S., S. Ramanathan, y Tanmay Basak. 2013. “Microwave food processing—A review”. *Food Research International* 52(1):243–61. doi: 10.1016/j.foodres.2013.02.033.
- Chávez, Davy, José Ascheri, Amanda Martins, Carlos Carvalho, Cristiany Bernardo, Aline Teles., y Aline Teles. 2018. “Sorghum, an alternative cereal for gluten-free product”. *Revista chilena de nutrición* 45(2):169–77. doi: 10.4067/s0717-75182018000300169.
- Chelladurai, Samson Jerold Samuel, Murugan K., Abhra Pratip Ray, Makarand Upadhyaya, Venugopal Narasimharaj, y Gnanasekaran S. 2020. “Optimization of process parameters using response surface methodology: A review”. *Materials Today: Proceedings* (xxxx). doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.466.
- Chinnaswamy, R., y K. R. R. BHATTACHARYA. 1983. “Studies on Expanded Rice. Optimum Processing Conditions”. *Journal of Food Science* 48(6):1604–8. doi: 10.1111/j.1365-2621.1983.tb05042.x.
- Clayton, Zachary S., Elizabeth Fusco, Lisa Schreiber, Jennifer N. Carpenter, Shirin Hooshmand, Mee Young Hong, y Mark Kern. 2019. “Snack selection influences glucose metabolism, antioxidant capacity and cholesterol in healthy overweight adults: A randomized parallel arm trial”. *Nutrition Research* 65:89–98. doi: 10.1016/j.nutres.2019.03.002.
- Danbaba, N., I. Nkama, M. H. Badau, y P. Y. Idakwo. 2018. “Statistical Modeling and Optimization of Processing Conditions of Twin-Screw Extruded Rice-Legume Instant Breakfast Gruel”. *Journal of Engineering, Technology and Environment* 14(4):693–712.
- Devi, Moirangthem Kalpana, y Susanta Kumar Das. 2017. “Microwave popping characteristics of paddy as affected by sample placement and geometry and process optimization”. *Journal of Food Engineering* 221:45–53. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.09.026.
- Dial, H. L. 2012. “Plant guide for sorghum (*Sorghum bicolor* L.)”. *USDA-Natural Resources Conservation Service* 5.

- FIRA. 2015. *Panorama Agroalimentario*.
- FIRA. 2019. *Panorama Agroalimentario Sorgo 2019*.
- FIRA, y Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. 2019. “Panorama Agroalimentario Sorgo 2019”. *Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial*.
- García-pinilla, Santiago, Gustavo F. Gutiérrez-lópez, Humberto Hernández-Sánchez, Gabriela Cáez-ramírez, Evangelina García-Armenta, y Liliana Alamilla-Beltrán. 2019. “Quality parameters and morphometric characterization of hot-air popcorn as related to moisture content”. *Drying Technology* 0(0):1–13. doi: 10.1080/07373937.2019.1695626.
- Gil Martínez, Cristina. 2020. “Metodología de Superficie de Respuesta (RSM)”. *RPubs* 24(4):15–17. Recuperado (https://rpubs.com/Cristina_Gil/RSM).
- GilPavas, Edison, José Medina, Izabela Dobrosz-Gómez, y Miguel Angel Gómez-García. 2014. “Statistical optimization of industrial textile wastewater treatment by electrochemical methods”. *Journal of Applied Electrochemistry* 44(12):1421–30. doi: 10.1007/s10800-014-0767-y.
- Golubinoва, Irena, Anelia Katova, Anna Ilieva, y Plamen Marinov-serafimov. 2017. “Popping characteristics of sorghum genotypes (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)”. *Food and Feed Research* (January). doi: 10.5937/FFR1702115G.
- Gopalakannan, S., y T. Senthilvelan. 2013. “Application of response surface method on machining of Al – SiC”. *Measurement* 46(8):2705–15. doi: 10.1016/j.measurement.2013.04.036.
- Gutiérrez Pulido, Humberto, y Román de la Vara Salazar. 2012. *Análisis y diseño de experimentos*. Vol. 46. 3a ed.
- Hamouchene, Izem, y Saliha Aoua. 2014. “Overview of Texture Profile Analysis”. *International Journal of Computer Vision and Image Processing* 1–50. Recuperado (<https://texturetechnologies.com/resources/texture-profile-analysis#tpa-measurements>).

- Hong, Qingyue, Guangjing Chen, Zhirong Wang, Xuhui Chen, Yue Shi, Qiaoli Chen, y Jianquan Kan. 2020. "Impact of processing parameters on physicochemical properties and biological activities of Qingke (highland hull-less barley) treated by steam explosion". *Journal of Food Processing and Preservation* (2). doi: 10.1111/jfpp.14793.
- Huertas-García, Rubén, Juan Carlos Gázquez-Abad, Francisco J. Martínez-López, y Irene Esteban-Millat. 2014. "Propuesta metodológica mediante diseños Box-Behnken para mejorar el rendimiento del análisis conjunto en estudios experimentales de mercado". *Revista Española de Investigación de Marketing ESIC* 18(1):57–66. doi: 10.1016/s1138-1442(14)60006-1.
- Jiménez Careaga, María Gilka. 2015. "Superficies de Respuesta mediante un Diseño Central compuesto". *Revista Varianza* 11:31–36.
- Jogihalli, Praveen, Lochan Singh, Kshitiz Kumar, y Vijay Singh Sharanagat. 2017. "Novel continuous roasting of chickpea (*Cicer arietinum*): Study on physico-functional, antioxidant and roasting characteristics". *LWT - Food Science and Technology*. doi: 10.1016/j.lwt.2017.08.029.
- Joshi, Nirav D., y Debandya Mohapatra. 2013. "Puffing Characteristics of Parboiled Milled Rice in a Domestic Convective – Microwave Oven and Process Optimization". *Food Bioprocess Technology*. doi: 10.1007/s11947-013-1220-7.
- Kazemian, Arash, Yaser basati, Meysam Khatibi, y Tao Ma. 2021. "Performance prediction and optimization of a photovoltaic thermal system integrated with phase change material using response surface method". *Journal of Cleaner Production* 290:125748. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125748.
- Kenawy, Ibrahim M. M., Mohamed M. Eldefrawy, Rania M. Eltabey, y E. G. Zaki. 2019. "Melamine grafted chitosan-montmorillonite nanocomposite for ferric ions adsorption : Central composite design optimization study". *Journal of Cleaner Production* 241:118189. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118189.
- Kora, Aruna Jyothi. 2019. "Applications of sand roasting and baking in the preparation of traditional Indian snacks: nutritional and antioxidant status". *Bulletin of the National Research Centre* 2. doi: <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0199-2>.

- Lee, Eun Yong, Kyung Il Lim, Jae-kag Lim, y Seung-taik Lim. 2000. "Effects of Gelatinization and Moisture Content of Extruded Starch Pellets on Morphology and Physical Properties of Microwave-Expanded Products". *Cereal Chemistry* 77(6):769–73.
- Llopart, E. E., y S. R. Drago. 2016. "Physicochemical properties of sorghum and technological aptitude for popping. Nutritional changes after popping". *LWT - Food Science and Technology* 71:316–22. doi: 10.1016/j.lwt.2016.04.006.
- Lohani, Umesh C., y K. Muthukumarappan. 2021. "Study of continuous flow ultrasonication to improve total phenolic content and antioxidant activity in sorghum flour and its comparison with batch ultrasonication". *Ultrasonics Sonochemistry* 71(September 2020):105402. doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105402.
- Manojkumar, Narasimhan, Chandrasekaran Muthukumar, y Govindasamy Sharmila. 2020. "A comprehensive review on the application of response surface methodology for optimization of biodiesel production using different oil sources". *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. doi: 10.1016/j.jksues.2020.09.012.
- Martines López, Enrique. 2012. "Importancia de la metrología en la determinación del contenido de humedad en granos". Pp. 18–32 en *Centro Nacional de Metrología*.
- Mastroianni, Michael R., Rong Liu, Bikram Sohi, y William A. Bucklew. 2015. "Hot air popcorn popper with dual all construction". 1(19).
- Minati, Mohapatra, y S. K. Das. 2011. "Effect of Process Parameters and Optimization on Microwave Puffing Performance of Rice". *Research Journal of Chemistry and Environment* (June).
- Minitab. 2019. "¿Qué son los diseños de superficie de respuesta, los diseños centrales compuestos y los diseños de Box-Behnken?" Recuperado el 3 de septiembre de 2021 (<https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/response-surface-designs/response-surface-central-composite-and-box-behnken-designs/#:~:text=Un diseño de Box-Behnken es un tipo de diseño,inyección una>).

- Mir, Shabir Ahmad, Sowriappan John Don Bosco, Manzoor Ahmad Shah, Mohammad Maqbool Mir, y Kappat Valiyapeediyekkal Sunooj. 2015. “Process Optimization and Characterization of Popped Brown Rice”. *International Journal of Food Properties* 19(9):2102–12. doi: 10.1080/10942912.2015.1105254.
- Mishra, Gayatri, D. C. Joshi, Brajesh Kumar Panda, y Brajesh Kumar Panda. 2014. “Popping and Puffing of Cereal Grains: A Review”. *Journal of Grain Processing and Storage* 1(2):34–46.
- Mishra, Gayatri, Dinesh C. Joshi, y Debabandya Mohapatra. 2015. “Optimization of pretreatments and process parameters for sorghum popping in microwave oven using response surface methodology”. *Journal of Food Science and Technology* 52(12):7839–49. doi: 10.1007/s13197-015-1898-9.
- Mishra, Gayatri, Dinesh C. Joshi, Debabandya Mohapatra, V. Bhushan Babu, y V. Bhushan Babu. 2015. “Varietal influence on the microwave popping characteristics of sorghum”. *Journal of Cereal Science* 65:19–24. doi: 10.1016/j.jcs.2015.06.001.
- Momanyi, D., W. Owino, y A. Makokha. 2020. “Formulation, nutritional and sensory evaluation of baobab based ready-to-eat sorghum and cowpea blend snack bars”. *Scientific African* 7. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00215>.
- Montgomery, Douglas C. 2004. *Diseño y análisis de experimentos*. Limusa, S. New York.
- Mousavi, Seyyed Javad, Mehdi Parvini, y Mohsen Ghorbani. 2018. “Experimental design data for the zinc ions adsorption based on mesoporous modified chitosan using central composite design method”. *Carbohydrate Polymers* 188:197–212. doi: 10.1016/j.carbpol.2018.01.105.
- NIST. 2013a. “5.3.3. How do you select an experimental design?” en *Engineering Statistics Handbook*.
- NIST. 2013b. “5.3.3.6.1. Central Composite Designs (CDD)”. en *Engineering Statistics Handbook*.
- Olamiti, G., T. K. Takalani, D. Beswa, y A. I. O. Jideani. 2020. “Effect of malting and fermentation on colour, thermal properties, functional groups and crystallinity level of

- flours from pearl millet (*Pennisetum glaucum*) and sorghum (*Sorghum bicolor*)”. *Heliyon* 6(12):e05467. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05467.
- Palma, Roxanna Patricia. 2022. “Análisis crítico del coeficiente de determinación (R²), como indicador de la calidad de modelos lineales y no lineales.” *Matemática* 20(2):1–12.
- Pan, L., D. An, y W. Y. Zhu. 2021. “Sorghum as a dietary substitute for corn reduces the activities of digestive enzymes and antioxidant enzymes in pigs”. *Animal Feed Science and Technology* 273(June 2020). doi: 10.1016/j.anifeedsci.2021.114831.
- Paraginski, Ricardo Tadeu, Nelisa Lamas de Souza, Gabriela Hornke Alves, Valmor Ziegler, Maurício de Oliveira, y Cardoso Elias Moacir. 2016. “Sensory and nutritional evaluation of popcorn kernels with yellow, white and red pericarps expanded in different ways”. *Journal of Cereal Science* 69:383–91. doi: 10.1016/j.jcs.2016.05.013.
- Paraginski, Ricardo Tadeu, Nelisa Lamas de Souza, Gabriela Hornke Alves, Valmor Ziegler, Maurício de Oliveira, y Moacir Cardoso Elias. 2016. “Sensory and nutritional evaluation of popcorn kernels with yellow, white and red pericarps expanded in different ways”. *Journal of Cereal Science* 69:383–91. doi: 10.1016/j.jcs.2016.05.013.
- Puangjinda, Kanokwan, Narumol Matan, y Mudtorlep Nisoa. 2016. “Effects atmospheric radio-frequency plasma treatment on popping characteristics of popped rice and its nutritional evaluation”. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 35:119–24. doi: 10.1016/j.ifset.2016.04.010.
- Pugh, N. Ace, Joseph M. Awika, y William L. Rooney. 2017. “Heritability of Popping Characteristics in Sorghum Grain”. *Crop Science* 57(1):71–77. doi: 10.2135/cropsci2016.04.0250.
- Raigar, Rakesh Kumar, Rohit Upadhyay, y Hari Niwas Mishra. 2017. “Optimization of microwave roasting of peanuts and evaluation of its physicochemical and sensory attributes”. *Journal of Food Science and Technology* 54(7):2145–55. doi: 10.1007/s13197-017-2654-0.
- Reyes Gasga, José. 2020. “Breve reseña histórica de la microscopía electrónica en México

y el mundo”. *Mundo Nano* 13(25):79–100.

Rodríguez del Bosque, Luis A., y Antonio P. Terán Vargas. 2018. *MANEJO INTEGRADO DEL PULGÓN AMARILLO DEL SORGO EN TAMAULIPAS*.

Rooney, Travis E., y William L. Rooney. 2013. “Genotype and Environment Effects on the Popping Characteristics of Grain Sorghum”. *Journal of Crop Improvement* 27(4):460–68. doi: 10.1080/15427528.2013.794181.

Rosas Saito, Greta Hanako. 2020. “Microscopía electrónica de barrido y microanálisis de elementos del Clúster Científico y Tecnológico BioMimic®”. *Ciencia Hoy* 3:1.

Rudnykh, Svetlana Ivanovna, y Víctor Ignacio López Ríos. 2018. “Elección de la función de deseabilidad para diseños óptimos bajo restricciones”. *Revista EIA* 15(30):171–87. doi: <https://doi.org/10.24050/reia.v15i30.903>.

SADER. 2016. “Cinco derivados del sorgo que no conocías”. *www.gob.mx*. Recuperado el 16 de marzo de 2021 (<https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/cinco-derivados-del-sorgo-que-no-conocias>).

SADER, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. 2021. “Anuncia Agricultura nuevo precio de garantía para pequeños productores de maíz en el 2022”. *Prensa Secretaría de Gobierno*, 2–5.

Samsung. 2018. “Limpieza del horno microondas”. Recuperado el 26 de marzo de 2021 (https://publish.samsungsimulator.com/simulator/3cd7182c-da35-4911-9dcd-8ac9e0f5f501/#!topic/información_básica/limpieza).

Sharanagat, Vijay Singh, Lochan Singh, y Kshitiz Kumar. 2018. “Effect of Roasting Method on Physico-Mechanical and Roasting Characteristics of Chickpea (*Cicer arietinum*)”. (April).

Sharanagat, Vijay Singh, Rajat Suhag, Pulkit Anand, Gaurav Deswal, Rohit Kumar, Archit Chaudhary, Lochan Singh, Omkar Singh Kushwah, Saravanan Mani, Yogesh Kumar, Prabhat K. Nema, Omkar Singh, Saravanan Mani, Yogesh Kumar, y Prabhat K. Nema. 2019. “Physico-functional, thermo-pasting and antioxidant properties of microwave roasted sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]”. *Journal of Cereal Science*

85(2019):111–19. doi: 10.1016/j.jcs.2018.11.013.

Sharma, Paras, y Hardeep Singh Gujral. 2011. “Effect of sand roasting and microwave cooking on antioxidant activity of barley”. *Food International Research* 44(1):235–40. doi: 10.1016/j.foodres.2010.10.030.

Sharma, Vinita, P. S. Champawat, y V. D. Mudgal. 2014. “Process development for puffing of Sorghum”. *International Journal of Current Research and Academic Review* 2(1):164–70.

SIAP. 2021. “Escenario mensual de productos agroalimentarios”. *Agricultura* 4–6.

SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2020. “Panorama Agroalimentario 2020”. *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*.

van der Sman, R. G. M. G. M., y J. R. R. Bows. 2017. “Critical factors in microwave expansion of starchy snacks”. *Journal of Food Engineering* 211:69–84. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.05.001.

Statista, Research. 2021. “México: volumen de producción de cultivos cíclicos 2020, por tipo”. *Statista* 2021–22.

Subramani, Deepak, Sharmila Tamilselvan, Maheswari Murugesan, y M. S. Shivaswamy. 2020. “Optimization of sand puffing characteristics of quinoa using response surface methodology”. *Current Research in Nutrition and Food Science* 8(2):504–15. doi: 10.12944/CRNFSJ.8.2.16.

Sweley, Jess C., Devin J. Rose, y David S. Jackson. 2013. “Quality Traits and Popping Performance Considerations for Popcorn (*Zea mays* Everta)”. *Food Reviews International* 29(2):157–77. doi: 10.1080/87559129.2012.714435.

Tavanandi, Hrishikesh A., Amit K. Das, K. Venkateshmurthy, y K. S. M. S. Raghavarao. 2020. “Design and development of a machine for continuous popping and puffing of grains”. *Journal of Food Science and Technology*. doi: 10.1007/s13197-020-04680-3.

Torres, Gonzalez, José David, Morelos González, Kevin José, Correa Acevedo, y Diofanor. 2015. “Análisis del Perfil de Textura en Frutas, Productos Cárnicos y Quesos”.

ReCiTeIA 14(2):63–75.

- Vázquez-Araújo, Laura, Edgar Chambers Iv, y Panat Cherdchu. 2012. “Consumer Input for Developing Human Food Products Made with Sorghum Grain”. *Journal of Food Science* 77(10):1–6. doi: 10.1111/j.1750-3841.2012.02917.x.
- Vázquez-Carrillo, María Gricelda, David Santiago-Ramos, y Juan de Dios Figueroa-Cárdenas. 2019. “Kernel properties and popping potential of Chapalote, a Mexican ancient native maize”. *Journal of Cereal Science* 86(March):69–76. doi: 10.1016/j.jcs.2019.01.010.
- Vázquez-Sosa, G. G., A. H. Cabrera-Ramírez, M. Gaytán-Martínez, y E. Morales-Sánchez. 2021. “Métodos populares para obtener palomitas de sorgo”. *INNOVATE* 3(3):14–17.
- Vera Candiotti, Luciana, María M. De Zan, María S. Cámara, y Héctor C. Goicoechea. 2014. “Experimental design and multiple response optimization. Using the desirability function in analytical methods development”. *Talanta* 124:123–38. doi: 10.1016/j.talanta.2014.01.034.
- Virost, Emmanuel, y Alexandre Ponomarenko. 2015. “Popcorn: Critical temperature, jump and sound”. *Journal of the Royal Society Interface* 12(104). doi: 10.1098/rsif.2014.1247.
- Zbair, M., Z. Anfar, H. Ait Ahsaine, N. El Alem, y M. Ezahri. 2018. “Acridine orange adsorption by zinc oxide/almond shell activated carbon composite: Operational factors, mechanism and performance optimization using central composite design and surface modeling”. *Journal of Environmental Management* 206:383–97. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.10.058.