Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

"Estandarización del proceso de nixtamalización y su efecto en la calidad funcional de la masa deshidratada de maíz azul"

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de

Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

Presenta:

IBQ Karla Berenice Ortega Moreno

Dirige:

Dra. Marcela Gaytán Martínez

México, Querétaro, Qro.

REPOSITORIO INSTITUCIONAL DGBSDI-UAQ

La presente obra está bajo la licencia:
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es

CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:

Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada , brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios . Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.

NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales .

SinDerivadas — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una excepción o limitación aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como publicidad, privacidad, o derechos morales pueden limitar la forma en que utilice el material.

Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

"Estandarización del proceso de nixtamalización y su efecto en la calidad funcional de la masa deshidratada de maíz azul"

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de

Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

Presenta:

IBQ Karla Berenice Ortega Moreno

Dirige:

Dra. Marcela Gaytán Martínez

Dra. Teresita Arredondo Ochoa

Secretario

Dra. Magdalena Mendoza Sánchez

Vocal

MAP José Agustín Martínez Rodríguez

Suplente

MIC Javier García Pérez

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Junio, 2026

México, Querétaro, Qro.

DEDICATORIAS

A Dios, porque con él lo soy todo y sin él no soy nada.

A mi padre y a mi madre, Sergio A. Ortega Ortega y Silvia Moreno García, por su amor y apoyo incondicionales, les agradezco profundamente todo lo que han hecho por su familia. Lo que soy hoy es gracias a ambos; mi fuente de poder y estabilidad está en mis padres.

A mis hermanas, S. Patricia Ortega Moreno y Jaqueline Ortega Moreno, gracias por el apoyo, el acompañamiento, su presencia y ejemplo me impulsan para seguir adelante.

A todos mis amigos, familiares y maestros, que han creído en mí y me han acompañado en algún momento de mi vida, enriqueciéndola con sus experiencias y sabiduría.

Soy la mezcla de todos los lugares y personas que han estado conmigo, y estoy orgullosa de ello.

Esta tesis no solo refleja el resultado de mi trabajo, sino también el sacrificio y amor que ustedes han hecho por mí. Les agradezco por siempre estar a mi lado, por su presencia constante y por nunca dudar de mí.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Querétaro por darme la oportunidad de formarme académicamente, así por facilitar los recursos, las instalaciones y el apoyo financiero que cubrió mis inscripciones semestrales, permitiéndome concluir satisfactoriamente mi formación en el programa de Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad de la Facultad de Ingeniería.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el financiamiento otorgado a través de los Proyectos de Investigación Científica y Humanística En Ejes Estratégicos 2025, proyecto número PEE-2025-G-216. Para la finalización de este proyecto, contribuyendo significativamente al avance del conocimiento en el campo mexicano.

Extiendo mi más sincero agradecimiento al Laboratorio de Carbohidratos Funcionales de la Universidad Autónoma de Querétaro, por compartir sus conocimientos, brindarme su valioso apoyo y permitirme el uso de sus instalaciones para la realización de este proyecto.

Al programa de Maestría en Calidad y Productividad y al coordinador, el Dr. Eric Leonardo Huerta Manzanilla, nada de esto sería posible sin el esfuerzo de nuestro coordinador, quien se adaptó y apoyó en los retos que se presentaron durante todo el proceso.

A la Dra. Marcela Gaytán, por haberme acogido dentro de su grupo de trabajo, haberme asistido como director de tesis y por haber sostenido este proyecto con su dedicación, su sabiduría y su invaluable conocimiento han sido la piedra angular de este proyecto.

Al Dr. Eduardo Morales, por su paciencia y apoyo al recibirme durante los tiempos de mi estancia en CICATA-IPN. De la misma forma, agradezco al Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada por su apoyo y financiamiento durante el proceso de experimentación.

A mi sínodo, la Dra. Teresita Arredondo Ochoa, quien con su constante acompañamiento ha hecho posible la escritura del presente documento.

A mi sínodo el MAP. José Agustín Martínez Rodríguez y el Dr. Javier García Pérez, su expertise ha permitido que este trabajo sea más amplio.

A la Dra. Magdalena Mendoza Sánchez y la Dra. Amira Galvo, ambas fueron fundamentales con un apoyo no solamente técnico, sino moral; ofrecieron su acompañamiento incondicional durante todo el proceso.

ÍNDICE

Índice de Figuras 8
Índice de Tablas 9
Índice de Ecuaciones 10
Resumen 12
I. Introducción 14
II. Antecedentes 16
III. Fundamentación Teórica 19
3.1. El maíz como cultivo clave: panorama internacional y nacional 19
3.2. Importancia cultural e interés comercial del maíz azul 21
3.3. Estructura, composición química y propiedades nutracéuticas del maíz azul 23
3.4. Proceso de nixtamalización 26
3.4.1. Cambios fisicoquímicos del maíz durante la nixtamalización 26
3.4.2. El maíz azul y las variables de su nixtamalización 28
3.5. Propiedades tecno-funcionales 30
3.5.1. Determinación de humedad 31
3.5.2. Determinación del pH 31
3.5.3. Viscosidad 31
3.5.4. Índice de absorción de agua 32
3.5.5. Capacidad de absorción de agua 32
3.5.6. Capacidad de absorción de aceite 32
3.6. Estandarización de procesos: panorama a través del tiempo y métodos estadísticos. 33
3.6.1. Método análisis de varianza 34
3.6.2. Estudio R&R 34
3.6.3. Metodología de superficie de respuesta 35
IV. Descripción del Problema 36
V. Justificación 36
VI. Hipótesis 37
VII. Objetivos 37
7.1. Objetivo general 37
7.2. Objetivos específicos 37
VIII. Metodología 38
8.1. Estrategia general 38
8.2. Diseño de experimentos; método de superficie de respuesta 39

8.3. Limpieza y caracterización de la muestra 41
8.3.1 Determinación de impurezas, de granos quebrados y granos dañados 41
8.3.2 Determinación del tamaño de grano a través del peso de cien granos (PCG) 42
8.3.3 Determinación de la dureza del grano de maíz 42
8.3.4 Determinación de dureza del peso hectolítrico 43
8.4. Protocolo experimental de nixtamalización y obtención de harinas 43
8.5. Análisis de propiedades fisicoquímicas de las harinas 44
8.5.1 Determinación de humedad 44
8.5.2 Determinación pH 44
8.5.3 Viscosidad 44
8.5.4 Índice de absorción de agua 44
8.5.5 Capacidad de absorción de agua y aceite 45
IX. Resultados y discusión 46
9.1. Limpieza y caracterización de la muestra 46
9.2. Gage R&R 47
9.3. Propiedades fisicoquímicas 48
9.3.1. Determinación de humedad 50
9.3.2. Determinación del pH 52
9.3.3. Viscosidad 53
9.3.4. Índice de absorción de agua 64
9.3.5. Capacidad de absorción de agua 71
9.3.6. Capacidad de absorción de aceite 74
9.4. Discusión 77
X. Conclusiones 81
XI. Referencias 83

Índice de Figuras

Figura 1. Distribución global del maíz: origen y expansión agroalimentaria (Rodríguez-Salinas et al., 2020). 20
Figura 2. Estructura del grano de maíz (Gaxiola et al., 2025)..... 23
Figura 3. Metodología; Estrategia general. 39
Figura 4. Resultados del porcentaje de humedad en los 20 tratamientos del MSR..... 51
Figura 5. Resultados del pH en los 20 tratamientos del MSR..... 52
Figura 6. Perfil de viscosidad para los 20 tratamientos de MDMA. 54
Figura 7. Gráficas de las superficies de respuesta de la viscosidad. a) Interacción cocción-reposo. b) Interacción cocción-secado. c) Interacción reposo-secado..... 60
Figura 8. Gráfica de intervalos de viscosidad máxima (cP) vs. Experimentos. 62
Figura 9. Distancias de Cook para los resultados de la viscosidad máxima. 63
Figura 10. Resultados del índice de absorción de agua en los 20 tratamientos del MSR. . 64
Figura 11. Gráficas de las superficies de respuesta del IAA. a) Interacción cocción-reposo. b) Interacción cocción-secado. c) Interacción reposo-secado. 68
Figura 12. Distancias de Cook para los resultados del IAA..... 70
Figura 13. Resultados de la capacidad de absorción de agua en los 20 tratamientos del MSR..... 71
Figura 14. Gráficas de las superficies de respuesta del CAAg. a) Interacción cocción-reposo. b) Interacción cocción-secado. c) Interacción reposo-secado..... 73
Figura 15. Resultados de la capacidad de absorción de aceite en los 20 tratamientos del MSR..... 75
Figura 16. Gráficas de las superficies de respuesta del CAAc. a) Interacción cocción-reposo. b) Interacción cocción-secado. c) Interacción reposo-secado..... 77

Índice de Tablas

Tabla 1. Composición química del maíz pigmentado de México (Rodríguez-Salinas et al., 2020). 24
Tabla 2. Propiedades nutracéutica del maíz pigmentado de México (Rodríguez-Salinas et al., 2020). 25
Tabla 3. Tamaño de los granos del maíz azul (García-Campos et al., 2020). 25
Tabla 4. Color del maíz azul en escala L* a* b* (García-Campos et al., 2020). 25
Tabla 5. Análisis químico proximal de tortillas de maíz azul nixtamalizado (Gaxiola et al., 2025). 27
Tabla 6. Compuestos bioactivos presentes en tortilla de maíz azul nixtamalizado (Gaxiola et al., 2025). 28
Tabla 7. Parámetros de las propiedades tecno-funcionales. 31
Tabla 8. Variables propuestas para el estudio. 39
Tabla 9. Tratamientos propuestos por el MSR, Minitab. 40
Tabla 10. Clasificación de tamaño según el PCG (Gaytán Martínez et al., 2012). 42
Tabla 11. Clasificación del grano de maíz por su dureza (Gaytán Martínez et al., 2012). 42
Tabla 12. Clasificación del grano de maíz por su dureza, peso hectolítrico (Gaytán Martínez et al., 2012). 43
Tabla 13. Caracterización del grano de maíz azul. 46
Tabla 14. ANOVA de reproducibilidad. 47
Tabla 15. Resultados de las propiedades tecno-funcionales de las MDMA. 49
Tabla 16. ANOVA de los puntos centrales del MSR. 50
Tabla 17. Análisis del comportamiento reológico de las MDMA. 56
Tabla 18. ANOVA de la viscosidad máxima de la MDMA. 57
Tabla 19. ANOVA de viscosidad de la MDMA, puntos centrales unificadas. 59
Tabla 20. ANOVA del índice de absorción del agua de la MDMA. 65
Tabla 21. ANOVA de índice de absorción de agua de la MDMA, puntos centrales unificadas. 67
Tabla 22. ANOVA de la capacitación de absorción del agua de la MDMA, puntos centrales unificadas. 72
Tabla 23. ANOVA de la capacitación de absorción del aceite de la MDMA, puntos centrales unificadas. 76

Índice de Ecuaciones

Ec. 1..... 41
Ec. 2..... 41
Ec. 3..... 41
Ec. 4..... 45
Ec. 5..... 45
Ec. 6..... 45

Abreviaturas y siglas

ANOVA: Análisis de varianza

CAAc: Capacidad de absorción de aceite

CAAg: Capacidad de absorción de agua

IAA: Índice de absorción de agua

MDMA: Masa deshidratada de maíz azul

MSR: Metodología de Superficie de Respuesta

Resumen

El objetivo de este estudio fue determinar el comportamiento que tiene el maíz azul, como grano suave, durante el proceso de nixtamalización, la presente investigación propone el uso de la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) como herramienta de optimización, con el objetivo de identificar el fundamento teórico, metodológico, potencialidades y resultados obtenidos en el desarrollo de masas deshidratadas de maíz azul (MDMA). Se seleccionaron como variables independientes los tiempos de cocción (25–30 min), reposo (5–24 h) y secado (6–15 h) durante la producción de las MDMA. Como variables dependientes se evaluaron las propiedades tecno funcionales de humedad, pH, viscosidad, índice de absorción de agua (IAA), capacidad de absorción de agua (CAAg) y capacidad de absorción de aceite (CAAc). Los resultados obtenidos evidenciaron las potencialidades de la MSR para identificar tendencias de respuesta y regiones experimentales de interés. Las MDMA obtuvieron de viscosidades máxima entre 4189 y 5524 cP, lo que demuestra una elevada estabilidad funcional frente a modificaciones moderadas del proceso. El IAA fue la propiedad más sensible a las condiciones de hidratación depende del historial térmico e hídrico del grano. Por el contrario, la CAAg mostró un comportamiento estable y sin efectos estadísticamente significativos, mientras que la CAAc presentó la existencia de regiones específicas del proceso capaces de maximizar esta propiedad. En conjunto, los resultados sugieren que el maíz azul posee una notable resiliencia tecnológica durante la nixtamalización, posicionándolo como una materia prima con alto potencial para el desarrollo de harinas funcionales y productos derivados de valor agregado.

Palabras clave: Maíz azul, nixtamalización, superficie de respuesta, viscosidad, harina.

Abstract

The aim of this study was to determine the behavior of blue corn, as a soft grain variety, during the nixtamalization process, this research proposes the use of Response Surface Methodology (RSM) as an optimization tool. The objective is to identify the theoretical and methodological foundations, potential, and results obtained in the development of dehydrated blue corn masa (DCM). Cooking time (25–30 min), resting time (5–24 h), and drying time (6–15 h) were selected as independent variables during DCM production. The tecno functional properties of moisture, pH, viscosity, water absorption index (WAI), water absorption capacity (WAC), and oil absorption capacity (OAC) were evaluated as dependent variables. The results obtained demonstrated the potential of RSM to identify response trends and experimental regions of interest. The DCM achieved maximum viscosities between 4189 and 5524 cP, demonstrating high functional stability in the face of moderate process modifications. The IAA was the property most sensitive to hydration conditions, depending on the grain's thermal and water history. In contrast, CAAg showed stable behavior with no statistically significant effects, while CAAc revealed specific regions of the process capable of maximizing this property. Overall, the results suggest that blue corn possesses remarkable technological resilience during nixtamalization, positioning it as a raw material with high potential for the development of functional flours and value-added derivative products.

Keywords: Blue maize, nixtamalization, response surface, viscosity, flour.

I. Introducción

La búsqueda de la calidad es un proceso inherente de la naturaleza humana, la selección del mejor producto y/o servicio es un acto natural que tiene el ser humano, como tendencia de nuestra propia evolución social. Es por ello que la sociedad ha encontrado formas de crear procesos que aseguren las mejores características de un producto y/o servicio, de esta forma se han diseñado normas que procuran la estandarización de los procesos. Las normas han adquirido diversificación y estandarizaciones específicas de cada ramo, es así como se han creado normativas especiales para el área de los alimentos y la aseguración de su calidad a nivel mundial (Hassan et al., 2023a).

Existen normas internacionales de cumplimiento obligatorio para el maíz, como lo son el Codex Alimentarius CXS 153-1985 la cual regula el maíz para consumo humano a nivel mundial, fijando límites máximos de humedad, materias extrañas, metales pesados y residuos de plaguicidas; las normas de la USDA, las cuales aseguran la exportación y comercialización internacional, se utilizan los estándares federales de granos de Estados Unidos, que miden el maíz quebrado y el material extraño; la norma ISO 6540, que define los métodos estándar para la determinación del contenido de humedad; y la ISO 13690, que establece los requisitos para el muestreo de lotes de cereales en grano (Astorga-Gaxiola et al., 2025).

De igual forma, en México se tienen normas nacionales de estilo voluntario y obligatorio hacia los productos del maíz nixtamalizado y subproductos, como lo son la NOM-187-SSA1/SCFI-2002, que establece las especificaciones sanitarias, de higiene y de información comercial que deben cumplir la masa, las tortillas y el maíz nixtamalizado, así como los establecimientos donde se procesan; la NOM-247-SSA1-2008, la cual regula las disposiciones nutrimentales y la adición o restitución de vitaminas y minerales en las harinas derivadas del maíz nixtamalizado; la NMX-FF-034-SCFI-2020,que define la clasificación y las características de calidad comercial del grano de maíz destinado al consumo humano y a la industrialización; y la NMX-F-046-SCFI-2018, que especifica los métodos de prueba y requisitos de calidad para las harinas de maíz nixtamalizado (Esparza et al., 2024).

Las normas en cuestión no establecen la diferencia entre la diversidad que existe en el maíz, sin embargo, las características que existen en sus componentes no son iguales,

especialmente a lo que se refiere el maíz blanco y amarillo de los pigmentados; las normas tampoco hablan de un procedimiento que garantice la calidad de las harinas de maíz nixtamalizado; no existe en la actualidad un estándar que se encargue de mantener el impacto que tiene la nixtamalización y el secado sobre las propiedades tecno funcionales de las harinas del maíz azul. La literatura científica se ha empezado a interesar en estas variables, sin embargo, queda mucho por investigar para lograr diseñar un proceso adecuado a la optimización de las harinas de maíz azul nixtamalizado, y se ha descubierto, que considerar a los maíces pigmentados como igualitarios a los blancos y amarillos es desestimar las propiedades inherentes del grano azul, y esto se debe especialmente a que en la producción nacional de maíces, solo el 1% es representativo de la producción de los maíces coloreados (Colombo et al., 2021).

Por lo tanto el propósito de esta investigación es mejorar la calidad funcional de la masa deshidratada de maíz azul mediante la estandarización del proceso de nixtamalización, con el fin de optimizar sus propiedades físico-químicas y tecno-funcionales. A través de un diseño experimental que permita obtener la optimización de las propiedades funcionales de la masa de maíz azul, en combinación de los tiempos de cocción, reposo y secado, con el fin de evaluar e identificar la combinación con mejores niveles.

II. Antecedentes

El maíz (*Zea mays*) representa el cultivo más importante de la alimentación humana, particularmente en Mesoamérica, donde ha sido parte fundamental de la dieta, la cultura y la identidad alimentaria de los pueblos originarios. Dentro de la gran diversidad genética del maíz, el maíz azul destaca por su color característico y su riqueza en compuestos fenólicos, especialmente antocianinas, responsables de su tonalidad azul-violeta. Estos pigmentos poseen una reconocida actividad antioxidante, y su consumo se ha relacionado con beneficios para la salud, incluyendo efectos antiinflamatorios, hipoglucemiantes y preventivos de enfermedades cardiovasculares y neurodegenerativas (Salinas-Moreno & Aguilar-Modesto, 2010).

A pesar de su relevancia nutricional y su potencial funcional, el maíz azul enfrenta una limitada incorporación en la agroindustria, en comparación con variedades blancas o amarillas de mayor rendimiento. Esta situación se debe en parte a la falta de normas aplicadas que permitan generar productos consistentes en calidad y funcionalidad, actualmente, no existe una guía que describa un procedimiento regulado para la obtención de harinas de maíz azul, tomando en consideración las características únicas de este grano, además que de igual forma, a las plantaciones del maíz azul no se les mantiene ni exige que exista estandarización, por ser mazorcas criollas, sus lotes cuentan con alta variabilidad . Un aspecto crítico en este contexto es la estandarización de su transformación mediante nixtamalización, proceso tradicional que ha demostrado ser fundamental para el aprovechamiento del maíz en diversas formas alimentarias, como la tortilla, tamales y harinas precocidas (Serna-Saldivar, 2016).

La nixtamalización es una técnica ancestral mesoamericana que consiste el cocimiento del maíz en una solución alcalina, comúnmente agua con hidróxido de calcio (cal), seguida por un periodo de reposo, lavado y molienda. Este proceso mejora significativamente la calidad nutricional del grano, al incrementar la disponibilidad de niacina, calcio y reducir compuestos anti nutricionales como el ácido fítico. Además, mejora la textura, sabor y funcionalidad de la masa para la elaboración de productos tradicionales (Serna-Saldivar et al., 1996; Vázquez-Carrillo et al., 2021). En el caso del maíz azul, la nixtamalización no solo

transforma sus propiedades físicas, sino que también influye directamente en la retención o pérdida de antocianinas, compuestos termo-sensibles y pH-sensibles que pueden degradarse significativamente si las condiciones del proceso no son adecuadas (Mora-Rochín et al., 2016).

Uno de los principales desafíos al nixtamalizar maíz azul es su variabilidad genética y morfológica, lo que complica la adopción de condiciones estandarizadas de cocción y reposo. Diferencias en el grosor del pericarpio, la dureza del grano, el contenido de pigmentos, el tamaño y la composición química afectan directamente la eficiencia del procesamiento, el tiempo requerido para la cocción, la absorción de agua y, en consecuencia, la textura y el rendimiento de la masa o la harina obtenida. Esta heterogeneidad se traduce en una inconsistencia en la calidad funcional del producto final, lo que representa un obstáculo para su uso industrial, donde la reproducibilidad es clave (Uriarte-Aceves et al., 2015).

Además, en ausencia de parámetros controlados y estandarizados, se corre el riesgo de una pérdida considerable de antocianinas durante la nixtamalización, principalmente por lixiviación en el nejayote (agua residual del proceso) o degradación por exposición térmica y alcalina. Esto implica no solo una reducción en el valor nutracéutico del producto, sino también un desaprovechamiento de compuestos de interés económico y funcional. La investigación ha mostrado que ciertos ajustes en variables como la concentración de cal, el tiempo de cocción, la relación grano/agua y los métodos de secado pueden tener un impacto significativo en la retención de estos compuestos y en las propiedades tecno-funcionales de las harinas (Del Pozo-Insfran et al., 2006; Lopez-Martinez et al., 2009).

Aunque la nixtamalización ha sido objeto de estudio con alto grado de interés, la evidencia científica actual sigue siendo insuficiente para desarrollar protocolos estandarizados orientados a la producción de harina de maíz azul. En especial, persisten vacíos de conocimiento respecto a las condiciones de procesamiento que permitan conservar sus propiedades tecno funcionales, limitando la generación de harinas con calidad consistente y adecuada para su uso final. La estandarización del proceso no solo tendría beneficios en términos de calidad y aprovechamiento del producto, sino que también permitiría ampliar su

presencia en el mercado, contribuir a la valorización de razas nativas y fortalecer sistemas alimentarios más sostenibles y culturalmente pertinentes.

En este sentido, el presente proyecto se enmarca en una necesidad urgente de generar conocimiento aplicado y contextualizado que contribuya a establecer un protocolo de nixtamalización técnicamente viable para el maíz azul. Esta iniciativa busca mejorar la calidad funcional de la harina obtenida, favorecer la retención de compuestos bioactivos, aumentar el rendimiento y permitir la integración de este insumo en esquemas agroindustriales que valoren tanto la funcionalidad nutricional como el patrimonio biocultural de las variedades nativas de maíz. Los beneficios de establecer una estandarización son las reducciones de costes indirectos y directos en la producción, apoya la automatización de los procesos y la mejora, se genera un mayor rendimiento y agiliza la toma de decisiones. La estandarización del proceso de la nixtamalización del maíz azul como masa deshidratada, permite la posibilidad de crear una norma que se establezca sobre el territorio mexicano, de este modo se eliminan las variaciones en la calidad de la masa.

Como parte del proyecto, se usara el Método de Superficie de Respuesta (MSR), usado en investigaciones que buscan optimizar los resultados de un producto estableciendo condiciones que nutran la calidad final, en investigaciones como la de (Menchaca-Armenta et al., 2020)) se desarrolló un procedimiento para crear harina para tortillas de maíz azul por medio de la extrusión, buscando que se mantenga la mayor cantidad de antocianinas en la tortilla final. Como resultado obtuvieron harinas con mínimas pérdidas de compuestos organolépticos activos como las antocianinas sin afectar negativamente la calidad gustativa del producto.

En un experimento para la optimización de los efectos de la nixtamalización sobre los contenidos nutricionales y anti nutricionales de harina de maíz de calidad proteica, los investigadores Hassan et al., (2023) realizaron un MSR con 3 niveles, donde analizaron el tiempo de cocción, el tiempo de reposo y el porcentaje de cal, demostrando que todas lasvariables son estadísticamente significativas ($p<0.05$), y que las mejores condiciones se muestran a los 20 min, 8 horas y 1% respectivamente.

III. Fundamentación Teórica

3.1.El maíz como cultivo clave: panorama internacional y nacional

La historia del maíz (*Zea mays*) se remonta a hace aproximadamente 8,700 años, en la región mesoamericana, donde fue domesticado y se convirtió en el alimento base de civilizaciones como la maya y la azteca. Además de su importancia nutricional, el maíz desarrollo un papel central en sus creencias eclesiásticas y prácticas ceremoniales. Los primeros indicios de su domesticación se localizan en el sur de México y Guatemala. Su expansión como cultivo requirió siglos de adaptación, lo que permitió su crecimiento en una amplia diversidad de entornos. El pueblo mesoamericano agregaba los granos de maíz al agua hervida, mezclaban con un producto alcalino que podía ser cenizas, concha de mar molida o cal, este proceso recibió el nombre de nixtamalización y se creó por el simple hecho de reblandecer el maíz, facilitando su consumo; pero también se dejaba fermentar el maíz duro para crear bebidas alcohólicas. La nixtamalización es un proceso clave para que los mesoamericanos pudieran dar variedad en sus alimentos, ya que la masa nixtamalizada o nixtamal, se aplicaba para hacer los caldos más espesos, cocinar el nixtamal solo o relleno de otros alimentos o la creación de la tortilla y sus derivados; pero un beneficio importante es el aporte del calcio proveniente del ingrediente alcalino para la nixtamalización, elevando su valor nutricional, y beneficiando la salud ósea. La presencia del maíz en la alimentación mexicana es extensa, se encuentra en la mayoría de los platillos típicos mexicanos, como lo son las tortillas, el atole, los totopos, los dulces, etc. Se trabajó durante milenios en la adaptación del maíz, logrando que las mazorcas de pequeño tamaño y con pocos granos sean lo que se conoce hoy en día (Vargas, 2014).

La difusión del maíz empezó entre los pueblos de toda América, para los años 3550 y 3234 a.C. ya eran consumidos en centro América y Sudamérica respectivamente, para 1650 a.C., el maíz tenía presencia Aridoamérica, el proceso de nixtamalización fue heredado junto con el maíz. Cuando don Cristóbal Colon llegó al continente, consideró al maíz como un alimento de buen sabor y lo llevó al viejo mundo. Una vez en Castilla, se observó que se cultivaba en abundancia y se extendió a nuevos destinos; para 1505 ya se conocía en China. En la actualidad, el maíz se cultiva en gran parte del mundo, como se muestra en la Figura 1. Su origen se encuentra en la región central y sur de México, así como en Guatemala (zonas

marcadas en verde), desde donde fue domesticado y difundido globalmente por su alto valor nutricional. Su introducción a nuevos territorios (coloreados en morado) ha sido clave en la seguridad alimentaria de numerosos países. Hoy en dia, el maíz es el cultivo agrícola con mayor producción a nivel mundial, con un estimado de 1,218 millones de toneladas en 2024. Su impacto ha sido especialmente relevante en África, donde ha contribuido a mitigar el hambre, aunque también ha desplazado cultivos tradicionales y transformado las bases de organización social en diversas regiones del continente (Vargas, 2014). El maíz azul, en la actualidad solo se siembra en la república mexicana, en estados como Campeche, Chiapas, Jalisco, Chihuahua, Guerrero, Puebla, Estado de México y Michoacán, sin embargo, al no ser un grano de interés comercial, los productores de maíz se han dedicado a la venta para un público que no exige cierta similitud entre lotes, y es por ello que no se han creado una estandarización del grano, y lo sembrado son maíces criollos, con alta variabilidad de una cosecha a otra, lo que dificulta que al momento de querer producir a nivel industrial el maíz azul; este de alta variabilidad en los granos de maíz se ve reflejado especialmente en el tamaño del grano, la cantidad de compuestos fenólicos, la dureza y la composición química (Pecuarias, 2020).



Figura 1. Distribución global del maíz: origen y expansión agroalimentaria (Rodríguez-Salinas et al., 2020).

México es conocido como el país de origen y variedad del maíz, entre las 220 razas de maíz identificadas en América, existen 59 especies bien definas de origen mexicano. A pesar de ser el país de origen del maíz, México está posicionado entre el 5° y 7° lugar de producción a nivel mundial, dirigido por EEUU, China, Brasil y Argentina (Cantillo Orozco & Bernal Payares, 2020).

Las 59 especies bien definidas de México son: Azul, Tehua, Tepecintle, Arrocillo Arrocillo, Tabloncillo, Blandito, Bolita, Cacahuacintle, Cónico, Blando Sonora, Carmen, Maizon, Clavillo, Motozinteco, Comiteco, Harinoso, Cónico Norteño, Coscomatepec, Tunicata, Complejo Serrano Jalisco, Cubano Amarillo, Chalqueno, Tablilla de Ocho, Reventador, Dulcillo Noroeste, Dzit Bacal, Elotes Occidentales, Elotero de Sinaloa, Fasciado, Zamorano Amarillo, Harinoso de Ocho, Jala, Apachito, Lady Finger, Cristalino Chihuahua, Maíz Dulce, Chapalote, Mushito, Nal-Tel de Altura, Olotillo, Oloton, Onaveno, Palomero de Chihuahua, Palomero Toluqueno, Ancho, Pepitilla, Ratón, Bofo, San Juan, Serrano de Jalisco, Amarillo, Tablilla, Conejo, Tabloncillo Perla, Celaya, Dulce de Jalisco, Tuxpeno Norteño, Nal Tel, Gordo, Tuxpeno, Vandeno, Xmejenal, Elotes Cónicos, Zapalote Chico, Zapalote Grande. Mientras que las seis especies imprecisas son Cubano Amarillo, del Caribe, y cuatro razas de Guatemala-Nal Tel de Serrano, Altura, Quicheno y Negro de Chimaltenango (Cantillo Orozco & Bernal Payares, 2020).

3.2.Importancia cultural e interés comercial del maíz azul

El maíz azul es una especie mexicana que se cultiva casi exclusivamente en México, en estados como Puebla, Chiapas, Jalisco, Estado de México Chihuahua, Guerrero, Michoacán y Campeche, junto con algunos estados del sur de EE. UU.. El estado con mayor producción de maíz azul es el Estado de México, con 200 mil toneladas anuales. La producción de maíz en México es de 27 millones de toneladas anuales, donde el 91 % es maíz blanco, el 8 % de maíz amarillo y el 1 % de maíces pigmentados, donde resalta el maíz azul (Pecuarias, 2020).

El maíz fue considerado por las culturas mesoamericanas como un regalo divino, símbolo de vida y fertilidad, y ocupó un lugar central en rituales, ceremonias y festividades vinculadas a la tierra y la agricultura. Dentro de la amplia diversidad de variedades existentes, el maíz azul destaca por ser resultado de siglos de adaptación, selección y

evolución, y representa un ejemplo valioso de la riqueza genética de México. Sin embargo, su producción a nivel nacional sigue siendo limitada, en parte debido a la falta de conocimientos que definan la selección de semillas de alta calidad. Esta baja disponibilidad ha provocado un incremento de hasta el 70 % en su precio en comparación con el maíz blanco, dificultando su acceso y uso más generalizado en la agroindustria (Pecuarias, 2020).

En los últimos tiempos se han desarrollado proyectos para elevar el interés comercial del maíz azul y se han desarrollado análisis de mercado para medir el interés del pueblo mexicano para consumir productos provenientes del maíz azul; Cantillo Orozco & Bernal Payares (2020) realizaron 90 encuestas en Acayucan, Veracruz sobre la disponibilidad de consumir productos del maíz azul, como lo son tortillas, totopos, pinole y masa, el resultado al consumo de tortillas, totopos y masa es de 96.9, 84.4 y 81.3 % respectivamente, temas como el aroma, la textura, el sabor y alimentos más saludables es lo que apoyan al consumo del maíz azul sobre el maíz blanco; Xochipa-Morante et al., (2021) estudiaron las preferencias de tortilla, pinole, totopos, tostadas de maíz azul, en 5 mercados locales, con 75 encuestas en la Sierra Nevada de Puebla, y se observa una clara decisión de la población inclinarse por las características organolépticas de los productos y las propiedades nutracéuticas, siendo la masa azul más suave y con mayores beneficios a la salud que el maíz blanco.

A pesar de la creciente aceptación de los productos elaborados a partir de maíz azul y del reconocimiento de sus atributos sensoriales y nutracéuticos por parte de los consumidores mexicanos, su aprovechamiento comercial continúa enfrentando importantes desafíos. Entre ellos destacan la limitada disponibilidad de materia prima, los elevados costos de producción y la ausencia de procesos estandarizados que permitan obtener harinas y productos con características de calidad consistentes. Asimismo, existe una escasez de investigaciones enfocadas en la mejora de las condiciones dl proceso de nixtamalización para mantener las propiedades tecnos funcionales del maíz azul, lo que restringe su incorporación a escala industrial. Estas limitaciones tecnológicas y comerciales han impedido que el potencial agroalimentario de este grano, profundamente arraigado en la cultura y tradición mexicana, se traduzca en una mayor competitividad y presencia dentro del mercado nacional e internacional.

3.3.Estructura, composición química y propiedades nutracéuticas del maíz azul

El grano de maíz consta de tres partes clave, las cuales se muestran en la Figura 2. El pericarpio, que actúa como una barrera protectora y está compuesto por la testa y la epidermis. El endospermo, que constituye la mayor parte del grano y se divide en endospermo córneo y harinoso; contiene almidón y estructuras celulares que determinan su comportamiento tecnológico. El germen, que concentra lípidos, vitaminas y enzimas necesarias para la germinación y es una fuente importante de compuestos funcionales. De particular relevancia en el maíz azul es la capa de aleurona, es decir, la capa más externa del endospermo. Esta capa permanece adherida al endospermo almidonado y es rica en proteínas y vitaminas del complejo B (B1, B2 y B3). Además de su valor nutricional, la aleurona contribuye a reducir las pérdidas de proteínas y almidón durante las etapas de cocción, remojo y lavado, como ocurre en la nixtamalización, ayudando así a conservar la calidad funcional de la harina obtenida (Gaxiola et al., 2025).

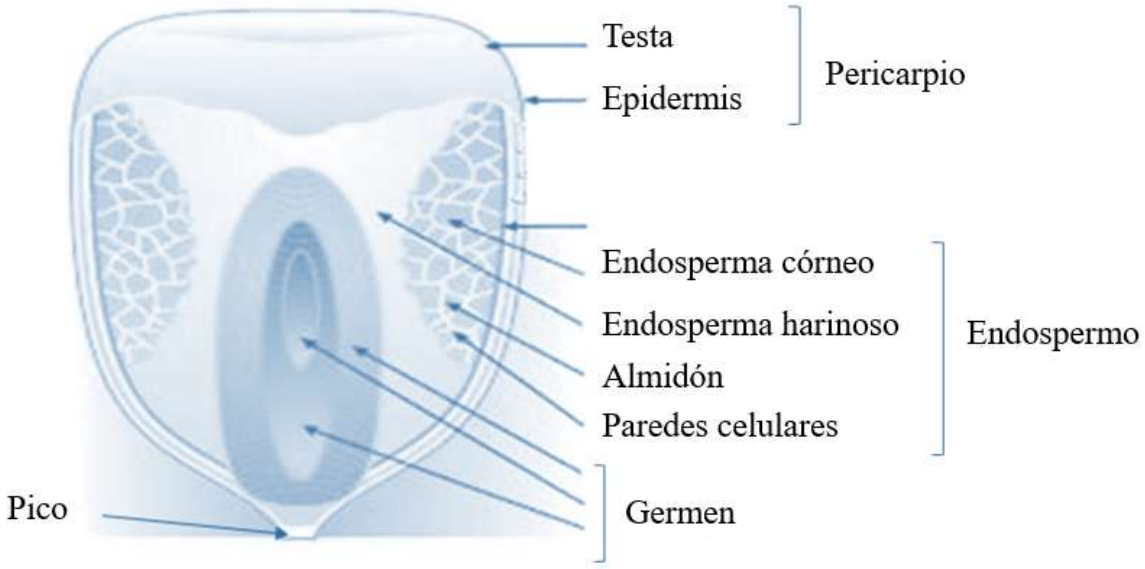


Figura 2. Estructura del grano de maíz (Gaxiola et al., 2025).

El maíz azul, pertenece al grupo de los maíces pigmentados, que comprende variedades como Hopi Blue, Yoeme Blue, Tarahumara y Río Grande Blue. Su principal característica

es la presencia de antocianinas, pigmentos fenólicos derivados de la cianidina que le otorgan su distintivo color azul-violeta y le confieren propiedades nutracéuticas, como actividad antioxidante, antiinflamatoria y efectos protectores frente a enfermedades crónicas. La localización de las antocianinas varía entre variedades: en los maíces rojos y negros se encuentran principalmente en el pericarpio (la capa más externa del grano), mientras que en el maíz azul predominan en la capa de aleurona, una región rica en nutrientes que recubre el endospermo. Esta diferencia estructural influye en la estabilidad y aprovechamiento de los compuestos bioactivos durante el procesamiento (Arellano Vázquez et al., 2021).

En la Tabla 1 se muestra la composición química del grano de maíz pigmentado, incluyendo su contenido de macro y microelementos. Esta composición le confiere cualidades funcionales de gran interés para la salud humana.

Tabla 1. Composición química del maíz pigmentado de México (Rodríguez-Salinas et al., 2020).

Composición química (g/100 g)		**Macroelementos (mg/100 g)**		**Microelementos (mg/100 g)**	
Humedad	8.23	Mg	128.95	Cu	0.23
Cenizas	1.24	Ca	25.04	Fe	1.16
Proteína	10.16	K	326.66	Zn	2.84
Grasas	4.05	Na	42.96	Mn	0.52
Fibra cruda	1.43	P	361.30	---	---
Carbohidratos	74.88	S	1.99	---	---

Los beneficios de las antocianinas y demás compuestos fenólicos del maíz azul incluyen efectos antioxidantes, antiinflamatorios y antitumorales, así como su potencial en la regulación de la glucosa, el colesterol, la salud visual y cognitiva, y el envejecimiento celular (Montaño-Arango et al., 2023; Kim et al., 2023). Además, diversos estudios sugieren su capacidad para modular la expresión génica, intervenir en rutas de señalización relacionadas con obesidad, resistencia a la insulina y estrés oxidativo, y regular la microbiota intestinal y la eliminación de metales pesados (Sánchez-Nuño et al., 2024).

La Tabla 2 muestra los niveles de compuestos bioactivos como fenoles, flavonoides, taninos y antocianinas, así como la capacidad antioxidante del maíz pigmentado.

Tabla 2. Propiedades nutracéutica del maíz pigmentado de México (Rodríguez-Salinas et al., 2020).

	Libres	Unidos	Totales
Fenoles (mg/100 g)	125.65	360.06	485.71
Flavonoides (mg/100 g)	38.25	34.50	72.75
Taninos condensados (mg/100 g)	158.55	--	158.55
Antocianinas	--	--	74.52
Componentes fenólicos (mg/100 g)	9.51	124.30	133.81
Capacidad antioxidante			
DPPH (μmolTE/100 g)	749.10	1091.10	1840.20
ABTS (μmolTE/100 g)	908.40	3053.25	3961.65
FRAP (μmolTE/100 g)	512.47	828.18	1340.65
ORAC (μmolTE/100 g)	3141.60	1021.72	4163.30

La concentración de antocianinas está influenciada por las características morfológicas del grano. Según Arellano Vázquez et al. (2021), se presenta una relación proporcionalmente inversa entre el tamaño y el contenido de cianidinas: mientras mayor tamaño y peso del grano, menor concentración de pigmentos; mientras que una mayor pureza del color azul (tonalidades menos saturadas y baja luminosidad) se asocia con un mayor contenido de antocianinas.

En la Tabla 3 se desglosan la media del tamaño del grano de maíz azul, y en la Tabla 4 se reportan las coordenadas de color (L*, a*, b*, h° y C), las cuales permiten caracterizar la tonalidad y pureza del pigmento azul.

Tabla 3. Tamaño de los granos del maíz azul (García-Campos et al., 2020).

Longitud (mm)	Ancho (mm)	Grosor (mm)	Peso hectolítrico (g)
8.96 ± 0.205	15.12 ± 0.327	5.545 ± 0.255	74.79 ± 1.350

Tabla 4. Color del maíz azul en escala L* a* b* (García-Campos et al., 2020).

L*	a*	b*	h0	C
50.14 ± 0.39	3.14 ± 0.08	0.99 ± 0.13	81.90 ± 2.53	3.31 ± 0.08

L: es luminosidad o brillantez; a* y b*: señalan las coordenadas de cromaticidad; h°: es color o tono y C: es croma o pureza de color.

3.4.Proceso de nixtamalización

La nixtamalización es un proceso térmico alcalino aplicado al maíz, que tiene como objetivo la degradación del pericarpio, la difusión de iones calcio y la hidratación de los granos de maíz (Gruintal-Santos et al., 2021). Este proceso se ha realizado desde el tiempo de los aztecas y se usa cal para llevar a cabo la nixtamalización, tiene ligeras variaciones conforme el tipo de maíz que se va a nixtamalizar, ya que el nivel de la dureza del maíz es lo que determina la cantidad de cal (1-3 %), durante la cocción empieza el desprendimiento del pericarpio y la absorción de la humedad al grano de maíz, este proceso puede durar 25 ± 5 min (Gaytán Martínez et al., 2012) y el tiempo de reposo (12-16 h) con el que se va a proceder, la temperatura de cocción varía de 72 °C al punto de ebullición. Existen dos resultados de este proceso: el maíz macerado, que recibe el nombre de nixtamal, y el nejayote, que es el agua residual, rico en sólidos de maíz. El nixtamal es lavado para retirar los trozos sueltos de pericarpio y es molido en piedra para obtener la masa (Sefa-Dedeh et al., 2004).

3.4.1. Cambios fisicoquímicos del maíz durante la nixtamalización

Esta técnica de cocción alcalina ablanda el pericarpio del maíz, con lo cual el endospermo absorbe el agua y se logra una molienda más sencilla. También se desarrolla una hidratación parcial del almidón y la difusión de los iones $Ca(OH)^{+}$ y Ca^{++} (Gruintal-Santos et al., 2021). Otros beneficios de la nixtamalización incluyen una mayor biodisponibilidad de niacina, una mejor calidad de la proteína, una mayor concentración de calcio y la disminución en la presencia de aflatoxinas en los productos de masa. En México, es preferido el uso de maíz blanco duro para la elaboración de la tortilla, debido a que ofrece una tortilla blanca de mayor calidad y existe una menor pérdida de sólidos, en comparación con granos de diferentes razas más blandas (Sefa-Dedeh et al., 2004). Estudios indican que el maíz es rico en aminoácidos como azufre, metionina y cistina, y en las tortillas existe poca reducción; sin embargo, en la proteína del maíz existe déficit en lisina y triptófano. Al momento de la nixtamalización se mejora el contenido de almidón resistente, dando como resultado de un índice glucémico más bajo y, además, se reducen las contaminaciones por micotoxinas (Schaarschmidt & Fauhl-Hassek, 2019).

En la Tabla 5 se muestra un análisis químico que se realizó a una tortilla de maíz azul, con el procedimiento tradicional de nixtamalización.

Tabla 5. Análisis químico proximal de tortillas de maíz azul nixtamalizado (Gaxiola et al., 2025).

Humedad	Proteínas	Lípidos	Cenizas	Carbohidratos
48.0 ± 0.0 %	9.0 ± 0.20 %	1.38 ± 0.10 %	1.36 ± 0.05 %	83.34 ±0.08 %

El aumento del pH y las altas temperaturas de cocción ayudan a los granos a humedecerse, ablandar su endospermo, lo que conlleva la liberación del pericarpio. Por lo tanto, las proteínas y otros componentes del grano de maíz, como carbohidratos solubles, fibra dietética y vitaminas, se lixivian en el líquido de cocción, provocando su pérdida al eliminar el nejayote, dejando los productos de maíz nixtamalizado nutricionalmente deficientes (Gaxiola et al., 2025).

La disminución de lípidos se ve afectado negativamente con los distintos tiempos y temperaturas de cocción de los granos de maíz, así como la pérdida del pericarpio y el germen (donde se encuentra el mayor contenido de lípidos en el maíz) durante la remoción del nejayote, y la saponificación de los aceites contenidos en la semilla de maíz. El contenido de cenizas aumenta por la adicción de calcio durante el proceso de nixtamalización, donde se acumula principalmente en el pericarpio y el germen, y es removido parcialmente durante el lavado del nixtamal (Gaxiola et al., 2025).

El contenido total de carbohidratos de las tortillas procesadas tradicionalmente varía de 44.08 a 87.56 %, esta variación se debe principalmente al grano de maíz y de los términos de la nixtamalización. El contenido total de carbohidratos muestra un comportamiento complejo durante la transformación de los granos de maíz a tortilla; puede aumentar, permanecer constante o disminuir debido a la pérdida excesiva de almidón, lípidos, proteínas y componentes del pericarpio durante la cocción, remojo y lavado. Estudios indican que las muestras nixtamalizadas contienen mayores niveles de amilosa en contraste con el almidón de maíz crudo, lo cual se atribuye a la despolimerización de la amilopectina durante el proceso de nixtamalización. Algunos autores propusieron que el incremento en el contenido de amilosa en muestras pigmentadas de maíz crudo a nixtamal resulta de la separación de

amilosa y antocianinas. Esta separación se produce debido a la ruptura de enlaces éster, los cuales son inestables en condiciones alcalinas (Gaxiola et al., 2025).

En la Tabla 6, se analizó los compuestos bioactivos presentes en la tortilla de maíz azul nixtamalizado. Puesto que los componentes fenólicos se ubican en la capa aleurona, ubicada en el pericarpio, al momento de la cocción un gran porcentaje se desprende y se remueve con el nejayote, perdiendo más del 90 % de su cantidad original.

Tabla 6. Compuestos bioactivos presentes en tortilla de maíz azul nixtamalizado (Gaxiola et al., 2025).

Antocianinas	**Componentes fenólicos (mg GAE/100 g)**		
(mg CGE/100 g)	Libres	Cadena	Total
4.01 ± 0.09	32.30 ± 3.45	125.8 ±16.01	158.1 ± 5.2

Las harinas del maíz azul, al igual que su grano proveniente, cuenta con una fuente de componentes nutricionalmente activos (carbohidratos, proteína y grasas) y compuestos antioxidantes (fenoles solubles, flavonoides y antocianinas); incluso desarrollan colores indicativos de calidad, mejorando los atributos sensoriales; sus propiedades fisicoquímicas y tecnológicas-funcionales son óptimas para la elaboración de bebidas y alimentos nutraceúticas (Esparza et al., 2024).

3.4.2. El maíz azul y las variables de su nixtamalización

El maíz azul es conocido por ser un maíz suave, por su peso hectolítrico y su nivel de flotación, el maíz tiende a ser más ligero y por ende los granos flotan al echarlos al agua. La razón de que el maíz azul sea suave se debe a que la fracción harinosa en el grano, es mayor a la fracción cristalina o vítrea. Los maíces con endospermo suave tienen una mejor hidratación gracias a que los gránulos de almidón son más receptivos al agua, además que el almidón presente en fracción harinosa contiene mayor porcentaje de amilopectina, que es capaz de absorber más rápidamente agua, al contrario del endospermo duro, que tiene fracción vítrea más alta y mayor amilosa, como resultado, el nivel de absorción de agua es más lenta. El rendimiento de la masa nixtamalizada se debe a la capacidad de absorber y retener el agua del grano de maíz, el porcentaje de pericarpio retenido durante el lavado y el cantidad de sólidos perdidos en el nejayote (Salinas-Moreno & Aguilar-Modesto, 2010).

Durante la nixtamalización tradicional, el pericarpio se hidroliza principalmente en arabinoxilanos; el almidón del endospermo experimenta una gelatinización parcial y un recocido simultáneos, la molienda posterior aumenta la gelatinización del almidón y permite una mejor interacción entre todos los componentes, principalmente entre los lípidos y el almidón, para formar complejos amilosa-lípido, la magnitud de estos cambios produce una masa con diferente comportamiento viscoelástico. En sistemas basados en almidón de maíz, informaron que la inclusión de arabinoxilanos elevo la viscosidad aparente, el módulo de almacenamiento y el módulo de pérdida, lo que sugiere entrelazamientos de cadena entre arabinoxilanos y moléculas de amilosa o amilopectina de cadena corta. La masa de maíz presenta un comportamiento pseudoplástico con un módulo de almacenamiento mayor que el módulo de pérdida, que depende de la concentración de Ca $(OH)_2$, lo que sugiere la formación de enlaces cruzados entre las cadenas de calcio y amilosa o amilopectina de los gránulos de almidón gelatinizados. Informaron que las interacciones calcio-proteína, así como la polimerización de proteínas, también tuvieron una fuerte influencia en la resistencia del gel de maíz al mejorar su carácter elástico. La formación de complejos amilosa-lípido disminuye la consistencia del gel de almidón, debido a la menor disponibilidad de amilosa para desarrollar una red de gel más fuerte. El recocido y la gelatinización del almidón dependen de la disociación de cada sal en agua y de la capacidad de los aniones para penetrar en el gránulo de almidón y romper los enlaces de hidrógeno. Todos estos cambios afectan las propiedades reológicas de la masa (Santiago-Ramos et al., 2018).

Las antocianinas son sensibles principalmente de la presencia de oxígeno, luz, pH, cambios de temperatura y de la presencia de iones metálicos (Ca^{2+}). Durante la nixtamalización, las antocianinas son expuestas a altas temperaturas, a humedad y niveles altos de pH, provocando la pérdida del 90 % de su cantidad original (aquí es necesario insertar una referencia que justifique ese dato). En los maíces pigmentados, las antocianinas se pueden encontrar en el pericarpio o la capa aleurona, las antocianinas ubicadas en el pericarpio se ven más expuestas a la solución alcalina, por lo que se ha demostrado que tienen una mayor pérdida que las ubicadas en la capa aleurona, como es el caso del maíz azul (Anayansi et al., 2013).

El impacto que existe en los tiempos de cocción durante la nixtamalización, permite la mejora de desprendimiento del pericarpio, logrando una mayor absorción de humedad y calcio, con tiempos alargados de cocción también se pierde la estructura e integridad del almidón, formando una pasta gelatinizada con mayor índice de absorción de agua, dificultando el proceso de elaboración de tortillas (Castillo et al., 2009). Durante el tiempo de reposo, el grano nixtamalizado, continua con una lenta absorción de humedad, después del cocimiento, posee un alrededor de 37 % de humedad, y es hasta las 4-5 h que alcanza su máximo porcentaje de saturación. A pesar de retirar de la fuente de calor, el nejayote sigue en una alta temperatura, esto facilita la continuación de absorción de humedad, no es hasta que está por debajo de los 68-70 °C (que es la temperatura de gelatinización del almidón del maíz) que termina el proceso (Arámbula Villa et al., 2001). Durante la molienda húmeda, el efecto de fricción entre las dos piedras crea un nuevo calor, que supera la temperatura de 70°C, recreando una segunda gelatinización de almidón (Valderrama Bravo et al., 2021).

El maíz azul al ser exclusivo de México no tiene normas internacionales que controlen su proceso de nixtamalización, y su producción al ser mínima del 1 % dentro de la República Mexicana, tampoco ha sido priorizada por las normas mexicanas, solo existen normas que están enfocadas en el maíz blanco como la NMX-FF-034/1-SCFI-2020. Es importante por todo lo ya mencionado, crear una norma que abarque las variables al momento de la nixtamalización del maíz azul para garantizar que el producto final posea la calidad que se merece.

3.5.Propiedades tecno-funcionales

Las propiedades tecno-funcionales de las harinas de maíz determinan la calidad de las harinas y su aplicación potencial en el mercado agroalimentario. Para el presente proyecto, las propiedades tecno-funcionales consideradas para medir la calidad de la MDMA fueron la humedad, el pH, la viscosidad, índice de absorción de agua (IAA), por sus siglas en inglés swelling power), capacidad de absorción de agua (CAAg) y capacidad de absorción de aceite (CAAc).

En la Tabla 7, se observan los rangos de las propiedades tecno-funcionales que se han obtenido de la literatura.

Tabla 7. Parámetros de las propiedades tecno-funcionales.

Propiedad	Unidad	Parámetro		Referencia
		Mín.	Max.	
Humedad	%	---	<15	(NOM-247-SSA1-2008, 2008)
pH	---	5.40	7.51	(Bressani et al., 2001)
Viscosidad máx.	cP			
IAA	g	1.04	9.02	(Esparza et al., 2024)
CAAg	%	1.2	1.35	
CAAc	%	4.65	4.75	(Esparza et al., 2024)

3.5.1. Determinación de humedad

El parámetro de la humedad está restringido por la *NOM-247-SSA1-2008,* (2008), el máximo permisible en harinas es 15% de humedad, con el control de la humedad, se previene el crecimiento microbiano.

3.5.2. Determinación del pH

En la producción de tortillas, el pH es crucial para el sabor, la textura, la capacidad de cocción y la vida útil, su variación se ve comprometida a que existen variaciones en el enjuague del maíz cocido después de la cocción. Un pH alcalino promueve una mayor absorción de agua por parte del grano de maíz. Esto se debe a la gelatinización parcial del almidón y a la solubilización de las hemicelulosas, lo que resulta en una masa con mejor hidratación y plasticidad, esenciales para la formación de tortillas flexibles y manejables. El ambiente alcalino ayuda a suavizar el pericarpio (cáscara) del maíz, facilitando su remoción y mejorando la molienda para obtener una masa uniforme y de calidad. La presencia del hidróxido de calcio promueve la liberación de la vitamina B3 (niacina), volviéndose biodisponible para consumo humano (Bressani et al., 2001).

3.5.3. Viscosidad

La viscosidad tiene una relación directa con el grado de gelatinización del almidón, los factores que afectan principalmente a esta propiedad son el tamaño de partícula, temperatura y trabajo mecánico. Cuando existe un equilibrio entre el máximo hinchamiento que logran

desarrollar los gránulos de almidón y la lixiviación de cadenas de amilosa, se logra la viscosidad máxima. Las harinas con una elevada cantidad de almidones que mantienen su estructura granular intacta obtienen cifras elevadas de viscosidad máxima. Durante el proceso térmico y mecánico de la molienda del maíz, se genera esfuerzo de corte, el cual logra el rompimiento de gránulos de almidón ocasionando mayor grado de daño y dextrinización. Un grado elevado de daño en el almidón produce una baja viscosidad (Contreras-Jiménez et al., 2014). Gránulos más pequeños tienen mayor capacidad para hincharse y retener agua, lo que incrementa la viscosidad.

3.5.4. Índice de absorción de agua

El IAA es representado por la integridad del almidón en presencia de agua, lo que sugiere que a mayor valor de IAA, mayor es el grado de gelatinización del almidón. Valores altos en este parámetro son deseables en la industria panadera, ya que permite el uso de un mayor volumen de agua en las preparaciones, lo que mejora el amasado y la frescura del producto final (Esparza et al., 2024).

3.5.5. Capacidad de absorción de agua

La capacidad de abosrción de agua (CAAg) es una propiedad de la harina, donde se evidencia la cantidad de agua que se ocupa para obtener la consistencia óptima para su uso, varía significativamente debido al proceso de nixtamalización y al contenido de humedad. La capacidad de absorción de agua de la harina es elemental para elaborar productos de consistencia adecuada como las tortillas, determinándose experimentalmente. Harinas con un contenido de humedad menor generalmente tendrán una menor absorción inicial. La CAAg es un indicador fundamental de la calidad de la harina para procesarla, afectando directamente el rendimiento y la textura del producto final, como las tortillas (Contreras-Jiménez et al., 2014).

3.5.6. Capacidad de absorción de aceite

La capacidad de absorción de aceite (CAAc) es una propiedad de sumo interés en la industria alimentaria ya que los lípidos mejoran textura, sabor y color, parámetros importantes para la industria de productos fritos, la panadera y la cárnica. Esta propiedad depende de la concentración de proteína, fibra y almidón; no obstante, en maíces nativos la capacidad de

absorción de aceite se ve influenciada por la relación amilosa-amilopectina y la longitud de sus cadenas (Esparza et al., 2024).

3.6. Estandarización de procesos: panorama a través del tiempo y métodos estadísticos.

La estandarización de los sistemas existe desde hace más de 20,000 años, se ha usado para implementar una medida de los tiempos, las distancias y los pesos, con el fin de eliminar la anarquía de los productos, en el siglo XIX se desarrolló y adopto el sistema de métrico decimal en Europa y a finales de siglo, EEUU e Inglaterra adaptaban su propio sistema al de Europa para asegurar la estandarización de las piezas entre fabricantes de un mismo montaje mecánico. Fue durante la primera guerra mundial, que se dio el inicio a las primeras normas de calidad, y a través de los años se crearon normas de calidad genéricas, pero no es hasta 1987 que se presenta un estándar de sistema de gestión de la calidad y su uso universal, la norma ISO 9000. En la actualidad, la norma ISO 9000 es ampliamente utilizada en todo el mundo como una guía para la gestión de la calidad. Se ha convertido en una herramienta esencial para garantizar la satisfacción del cliente y mejorar la eficiencia y la productividad de las organizaciones (Vázquez Peña & Labarca, 2013). La implementación de un nuevo estándar requiere de sistemas y métodos estadísticos para desarrollar un aporte a la cadena de producción, que permite una comparación y un análisis más sencillos entre diferentes conjuntos de datos; sistemas como el ciclo de PHVA (planificar, hacer, verificar y actuar) o los métodos estadísticos como el método ANOVA y el estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) son solo unos de los ejemplos que se pueden utilizar como herramientas (Stoyanova et al., 2022).

El uso de las herramientas estadísticas no solo tiene como propósito la mejora de la calidad del producto, sino que también ayuda a otros factores que pueden incluir, la mejora del proceso, la rentabilidad del proceso, y la disminución en la carga del trabajo, esto se puede ver en la disminución de los 8 desperdicios del Lean Manufacturing, que son la reducción de los productos y/o servicios defectuosos que su cumplimiento es nulo o inexistente con respecto a los estándares de calidad; se evita la sobreproducción, considerado como el peor desperdicio, ya que acumula mayor cantidad de producto de lo que el cliente demanda; se elimina tiempos de producción, tiempos muertos o de inactividad de operarios y máquinas;

se aprovecha el talento humano, eliminando el error humano con herramientas como el poka yoke, o analizando el rendimiento de los trabajadores con el gage R&R, determinando si las maquinas o el método es adecuado; elimina el transporte innecesario dentro del proceso, movimientos que no aportan valor; se aminora el inventario, el cual se vuelve en inmovilización del capital, ocupa espacio y aumenta el riesgo de deterioro u obsolescencia; se controla el movimiento de los propios trabajadores o equipos durante la realización de su trabajo; y se descarta el sobre procesamiento, el cual implica un uso excesivo de recursos o tecnología para tareas simples.

3.6.1. Método análisis de varianza

El método de análisis de varianza (ANOVA) es una herramienta estadística que se utiliza como la técnica angular durante un análisis de datos experimentales. El principio de la técnica es deconstruir la variación total en las partes con las que contribuye cada fuente de variación en el experimento, la variabilidad se diferencia en los tratamientos y la ocasionada por el error. El ANOVA se utiliza para medir la diferencia entre las medias de más de dos poblaciones, analizando la variabilidad que existen entre cada una. Cuando la variabilidad del tratamiento es superior a la del error, se entiende que los tratamientos tienen efecto (Humberto & Román, 2012).

3.6.2. Estudio R&R

El estudio R&R se analiza de modo experimental qué parte de la variabilidad total observada en los datos es atribuible al error de medición; de la misma forma, se logra medir si este error equiparable en contraste con la variabilidad del producto y con las limitaciones de la propiedad de calidad que se analiza. La repetibilidad de un instrumento de medición se refiere a la precisión o variabilidad de sus mediciones cuando se obtienen varias mediciones del mismo objeto en condiciones similares (mismo operador); mientras que la reproducibilidad es la precisión o variabilidad de las mediciones del mismo objeto pero en condiciones variables (diferentes operadores) (Pulido, 2013).

La procedencia de la variabilidad que se pueden estimar en un estudio R&R largo son: variabilidad de los operadores, del producto/ servicio y del instrumento. Sean σ^2_{total} la variabilidad total observada; σ^2_{prod} la varianza atribuible al producto (partes o piezas), σ^2_{inst}

la variabilidad o error del instrumento de medición y σ^2_{oper}la variabilidad o error debido a operadores (Pulido, 2013).

3.6.3. Metodología de superficie de respuesta

La metodología de superficie de respuesta (MSR) es una estrategia experimental que posibilita analizar las condiciones de operación para definir las condiciones óptimas en las que el producto muestra los valores óptimos con respecto a la calidad solicitada. EL MSR es una herramienta que se da cuando el proceso es estable y robusto; sin haber establecido anteriormente parámetros de operación, las condiciones óptimas podrían encontrarse en cualquier lugar de la operatividad, inclusive fuera de la región experimental. Una vez que el proceso es estable y estudiado, el punto óptimo podría encontrarse cerca de los parámetros de operación, lo cual podría significar que está cerca de lo óptimo. En diseños factoriales completos, se le llama "tratamiento ganador" al tratamiento mejor calificado de entre todos los que se analizaron en el estudio. Sin embargo, desde el punto de vista estadístico, el punto óptimo implica que es la mejor combinación posible en toda la región de operatividad. El MSR explora la superficie descrita por el modelo para encontrar la combinación de niveles en los factores que dan por resultado un valor óptimo de la respuesta, o bien, para determinar la dirección óptima de movimiento en la que se debe experimentar en el futuro (Humberto & Román, 2012).

En los estudios de Hassan et al., (2023b) y Milán-Carrillo et al., (2004), ambos utilizan el MSR para optimizar el proceso de fabricación de la harina de maíz nixtamalizada, en ambas literaturas se tienen como variables independientes a los tiempos de cocción, el tiempo de reposo y la concentración de cal. Los resultados de Hassan et al., (2023b) es que todas las variables dependientes son significativas estadísticamente, modificando las variables dependientes, que son: humedad, proteínas, grasas, fibra, cenizas, carbohidratos, energía, taninos, etc. Mientras que Milán-Carrillo et al., (2004), obtuvo un proceso optimizado midiendo las propiedades nutricionales de digestibilidad proteica in vitro, diferencia de color total, índice de absorción de agua y pH.

IV. Descripción del Problema

A pesar del alto valor nutracéutico del maíz azul, su aprovechamiento en la industria alimentaria es limitado debido a la falta de un proceso estandarizado de nixtamalización. Las características particulares de este grano, como su menor dureza y su contenido de pigmentos sensibles al calor, provocan variabilidad en la calidad de la masa y la harina, dificultando su uso a nivel comercial y reduciendo su valor funcional. Esto limita su inserción en mercados de alimentos saludables y su potencial de desarrollo local.

V. Justificación

El maíz azul es una variedad pigmentada (*Zea mays* L.) con alto valor nutracéutico. A pesar de su potencial funcional y de su importancia en la diversidad agroalimentaria mexicana, su uso industrial es aún limitado debido a la ausencia de protocolos estandarizados que aseguren un procesamiento eficiente y reproducible, especialmente en procesos tradicionales como la nixtamalización (Cantillo Orozco & Bernal Payares, 2020).

La nixtamalización, además de mejorar la biodisponibilidad de nutrientes, influye directamente en las características tecno-funciónales de la masa y la harina obtenida. No obstante, cuando se aplica al maíz azul, la variabilidad en su dureza, tamaño y contenido de pigmentos plantea desafíos en la optimización de tiempos de cocción, reposo y secado, afectando el rendimiento, la calidad y la estabilidad de los compuestos bioactivos (Mora-Rochín et al., 2016).

En el estudio de Salinas-Moreno & Aguilar-Modesto, (2010), se evaluó la humedad como indicador de la calidad de la tortilla, para una tortilla de calidad la masa debe ser suave, el grano debió llegar a mayor valor de 45% de humedad, y esto se logra con mayor facilidad con los granos suaves e intermedios. Sin embargo durante el tiempo de cocimiento no se logra todo el potencial de absorción se humedad, por ello, Arámbula Villa et al., (2001) analizaron como el tiempo de cocción y reposo pueden favorecer la suavidad de la tortilla; en tiempos cortos de cocción y reposo (<120 min), las tortillas se presentan duras y con poca elasticidad, en cambios a tiempos más prolongados (>120 min) la tortilla es adecuada para su consumo. En su estudio de tiempo de cocción y cal, Castillo et al., (2009) determinaron un proceso de nixtamalización con 30 min y el 1.5% de cal como la mejor forma de obtener viscosidad alta para la tortilla, y 30 min con 1% como la segunda mejor, si bien el aumento

de tiempo de cocción y de cal elevan el porcentaje de calcio en las tortillas, también eleva el porcentaje de gelatinización de las mismas.

Por tanto, este proyecto se justifica en la necesidad de generar conocimiento aplicado para establecer un proceso de nixtamalización técnicamente viable, que preserve las propiedades funcionales del maíz azul, mejore la calidad del producto final y sea escalable para su incorporación en procesos agroindustriales. Asimismo, busca atender los retos de aprovechamiento sustentable de razas nativas y el impulso a productos diferenciados con impacto en la salud y el desarrollo local.

VI. Hipótesis

La aplicación de la metodología de superficie de respuesta para la estandarización de los tiempos de cocción, reposo y secado durante el proceso de nixtamalización del maíz azul permitirá identificar condiciones de procesamiento capaces de mantener o favorecer la calidad funcional de la masa deshidratada de maíz azul, mediante la conservación de sus propiedades fisicoquímicas y tecno-funcionales, incrementando su potencial de aprovechamiento industrial.

VII. Objetivos

7.1. Objetivo general

Estandarizar el proceso de nixtamalización del maíz azul mediante la aplicación de la metodología de superficie de respuesta, para evaluar el efecto de los tiempos de cocción, reposo y secado sobre las propiedades fisicoquímicas y tecno-funcionales de la masa deshidratada de maíz azul.

7.2. Objetivos específicos

- Diseñar un método experimental que permita obtener la optimización de las propiedades funcionales de la masa de maíz azul, a través de combinación de los tiempos cocción, reposo y secado
- Evaluar el efecto de los tiempos de cocción, reposo y secado en la nixtamalización del maíz azul.
- Determinar las propiedades fisicoquímicas de las masas deshidratadas obtenidas a partir de los diferentes tratamientos.

- Identificar la combinación de cocción, reposo y secado que optimiza las propiedades funcionales de la masa de maíz azul.

VIII. Metodología

8.1. Estrategia general

Durante el presente proyecto se planteó una estrategia experimental estructurada para estandarizar el proceso de nixtamalización del maíz azul, considerando las variables clave que influyen en la calidad funcional de la harina obtenida. El procedimiento inició con la limpieza de los granos, con el objetivo de eliminar impurezas, residuos y granos dañados que puedan afectar la eficiencia del proceso o deteriorar las propiedades del producto final. Esta etapa también permitió cuantificar el porcentaje de material descartado respecto al peso total inicial.

Posteriormente, se realizó la caracterización física de los granos, específicamente el tamaño y la dureza, factores determinantes para estimar el grado de cocción necesario y la capacidad de absorción de agua. Se dio preferencia a granos medianos y pequeños por su mayor eficiencia en la hidratación y rendimiento en el proceso.

Con base en esta caracterización, se procedió a la nixtamalización, ajustando la concentración de cal y los tiempos de cocción. Después del cocimiento, los granos pasaron por una etapa de reposo y lavado, para permitir la acción del tratamiento alcalino y la eliminación del exceso de cal y pericarpio. Posteriormente, los granos fueron molidos y secados para la obtención de harinas.

Finalmente, se analizó las propiedades fisicoquímicas de las harinas producidas, enfocándose en variables como contenido de humedad, viscosidad y otras propiedades funcionales. Esta estrategia, Figura 3 experimental permitió evaluar el efecto de los tiempos de cocción, reposo y secado sobre la calidad de las harinas, con el fin de definir condiciones óptimas y estandarizadas para el tratamiento del maíz azul.

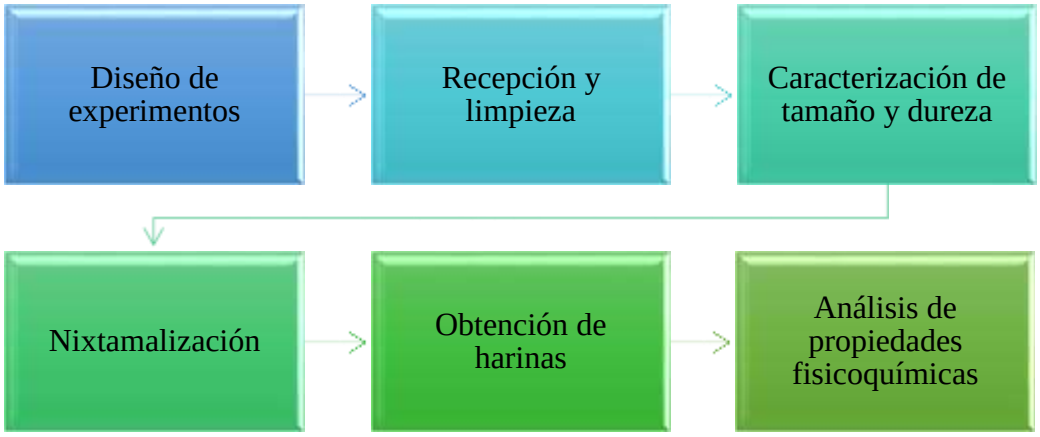


Figura 3. Metodología; Estrategia general.

8.2. Diseño de experimentos; método de superficie de respuesta

El MSR fue utilizado para establecer el punto óptimo entre las combinaciones de las variables del proceso de nixtamalización, utilizando el Diseño Central Compuesto. Se consideraron datos de la literatura y ensayos preliminares para seleccionar el número y el rango de variables de proceso en el diseño experimental. El DCC, se presenta como una de las herramientas más robustas para la optimización de procesos agroindustriales, debido a que existe la posibilidad de evaluar simultáneamente múltiples factores de operación, identificar posibles interacciones y efectos de curvatura, reducir el número de corridas experimentales y generar modelos predictivos útiles para la toma de decisiones en procesos de transformación de alimentos. Las variables consideradas fueron el tiempo de cocción, reposo y secado, los rangos se muestran en la Tabla 8. Se diseñó un experimento de tres niveles y 3 factores con 2 réplicas. Además, se incluyeron puntos axiales o estrella ($\pm\sqrt{2}$) para permitir la estimación de efectos cuadráticos y detectar posibles curvaturas en la respuesta. Las variables de respuesta seleccionadas en esta investigación fueron: humedad, pH, viscosidad, IAA, CAAg y CAAc.

Tabla 8. Variables propuestas para el estudio.

Variables	Nivel bajo (-1)	Centro	Nivel alto (+1)
Cocción	25	27.5	30
Reposo	6	15	24
Secado	5	10	15

Los resultados se analizaron mediante análisis de varianza unidireccional (ANOVA), seguido de las ecuaciones de Tukey para la comparación de medias con un nivel de significancia de 0.05. Para el análisis y la evaluación se utilizó el software de análisis estadístico Minitab® 18.1 © 2017 Minitab, Inc, R y Rstudio.

Tabla 9. Tratamientos propuestos por el MSR, Minitab.

	Cocción min	**Reposo h**	**Secado h**
M1	25 (-1)	6 (-1)	5 (-1)
M2	27.5 (0)	1 ($-\sqrt{2}$)	10 (0)
M3	27.5 (0)	15 (0)	10 (0)
M4	25 (-1)	24 (+1)	5 (-1)
M5	27.5 (0)	15 (0)	10 (0)
M6	31.70 ($+\sqrt{2}$)	15 (0)	10 (0)
M7	25 (-1)	6 (-1)	15 (+1)
M8	27.5 (0)	15 (0)	10 (0)
M9	27.5 (0)	15 (0)	19 ($+\sqrt{2}$)
M10	27.5 (0)	30 ($+\sqrt{2}$)	10 (0)
M11	30 (+1)	6 (-1)	5 (-1)
M12	27.5 (0)	15 (0)	10 (0)
M13	30 (+1)	24 (+1)	15 (+1)
M14	27.5 (0)	15 (0)	10 (0)
M15	27.5 (0)	15 (0)	2 ($-\sqrt{2}$)
M16	30 (+1)	6 (-1)	15 (+1)
M17	27.5 (0)	15 (0)	10 (0)
M18	30 (+1)	24 (+1)	5 (-1)
M19	23.30 ($-\sqrt{2}$)	15 (0)	10 (0)
M20	25 (-1)	24 (+1)	15 (+1)

La unidad experimental se realizó con 1 kg de maíz para cada tratamiento.

Los tratamientos propuestos por el MSR se encuentran en la Tabla 9. El diseño está conformado por: Puntos factoriales (2^3 = 8 tratamientos), que corresponden a las 8 combinaciones de los niveles bajos y altos de los tres factores (M1, M4, M7, M11, M13, M16, M18, M20), estos puntos permiten estimar los efectos lineales y las interacciones entre factores; Puntos axiales o estrella, que se ven representados en 6 tratamientos (M2, M6, M9,

M10, M15 y M19), estos puntos permiten estimar términos cuadráticos, detectar curvatura y localizar posibles óptimos; y Puntos centrales, que se encuentran en 6 tratamientos (M3, M5, M8, M12, M14 y M17), estos tratamientos permiten estimar el error puro y detectar curvatura.

8.3. Limpieza y caracterización de la muestra

Previo a la nixtamalización, se limpió el maíz de los cuerpos extraños, impurezas, maíz roto, decolorado, mordido o en mal estado. El uso de cribas favoreció el proceso de limpieza, permitiendo el paso de objetos más pequeños al tamaño promedio del maíz y ayudo a la visualización del maíz expuesto. Se usó la guía de Villegas, (s/f) para el análisis previo al maíz azul.

8.3.1 Determinación de impurezas, de granos quebrados y granos dañados

Para la determinación de impurezas, de granos quebrados y granos dañados, se utilizó 1 kg de maíz azul y se colocó sobre la criba (5 mm), de manera manual se separó y clasifico lo retirado en impurezas, en granos quebrados (los granos que tengan más del 50 % roto) y los granos dañados (granos decolorados, arrugados, perforados, mordidos, chupados, manchados, germinados o podridos). A cada grupo se le saco su peso y se realizó el cálculo con las ecuaciones 1-3, con ayuda de la ecuación 1 se determinó el porcentaje de las impurezas, con la ecuación 2 se determinó el porcentaje los granos quebrados (GQ), y con la ecuación se determinó el % de granos dañados

$$\%\ de\ impurezas = \frac{peso\ de\ impurezas\ (g)}{1{,}000\ g}\ x\ 100 \qquad \textbf{Ec. 1}$$

$$\%\ de\ GQ = \frac{peso\ de\ granos\ quebrados\ (g)}{1{,}000\ g} x\ 100 \qquad \textbf{Ec. 2}$$

$$\%\ de\ granos\ dañados = \frac{peso\ de\ granos\ dañados\ (g)}{1{,}000\ g}\ x\ 100 \qquad \textbf{Ec. 3}$$

8.3.2 Determinación del tamaño de grano a través del peso de cien granos (PCG)

Para la determinación del tamaño de los granos, se seleccionaron 100 granos completos y sanos de los granos a los que previamente ya se le había realizado limpieza, se pesaron y se seleccionaron el tamaño de los granos con la comparación de la Tabla 10. Se realizó 5 veces el procedimiento.

Tabla 10. Clasificación de tamaño según el PCG (Gaytán Martínez et al., 2012).

Peso de 100 granos (g)	Tamaño
> 38 g	Grandes
33 - 38 g	Medianos
< 33 g	Pequeños

8.3.3 Determinación de la dureza del grano de maíz

La determinación de la dureza es importante para poder establecer cuanta cal se añadirá al proceso de nixtamalización, la clasificación se divide en muy duros, duros, intermedios, suaves y muy suaves y se muestra en la Tabla 11 los resultados.

Tabla 11. Clasificación del grano de maíz por su dureza (Gaytán Martínez et al., 2012).

Granos flotando	Dureza
0-12	Muy duro
13-37	Duro
38-62	Intermedio
63-87	Suave
88-100	Muy suave

Primeramente, se preparó la solución de azúcar al 67 %, se ocupó azúcar refinada de la marca Aurrera, y en un matraz se agregó 670 g de azúcar, se le adiciono agua purificada al nivel de un litro y se mezcló, se dejó reposar 10 min, el nivel del agua es afectado por la incorporación del azúcar, así que se volvió a llenar al nivel de 1 litro y se volvió a mezclar. El volumen total fue de 1 L.

Se tomaron 100 granos completos y sanos y se pesaron. A un recipiente de 1 L transparente se le adicionaron 500 mL de la solución azucarada, se le añadieron los 100 granos y se agito

vigorosamente, se dejó reposar 1 minuto. Los granos que flotan fueron removidos para facilitar el conteo. Con ayuda de la Tabla 11, se determinó la dureza del maíz.

8.3.4 Determinación de dureza del peso hectolítrico

El peso hectolítrico es un parámetro que exige la norma mexicana NMX-FF-034/1-SCFI-2002, debido a que es un factor relacionado con la dureza, susceptibilidad a ruptura, rendimientos de molienda, velocidad de secado, condiciones generales del grano y resistencia al desarrollo de hongos. En una superficie lisa, se colocó una balanza y encima un matraz de 1 L, se tara. Encima del matraz, con ayuda de un soporte universal, se instaló un embudo a una distancia de 20 cm del matraz, del que se dejó caer los granos de maíz limpios hasta desbordar el matraz, se retiraron los excesos pasando una espátula en zigzag. Se pesó el recipiente con el grano (gramos) y se multiplico por 10 para expresar el resultado en kg/hL. Se verifico con la Tabla 12 la dureza del maíz.

Tabla 12. Clasificación del grano de maíz por su dureza, peso hectolítrico (Gaytán Martínez et al., 2012).

Peso (gramos)	Dureza
> 75	Duro
74-75	Intermedio
< 74	Suave

8.4. Protocolo experimental de nixtamalización y obtención de harinas

Primero se calentó 3 partes de agua, al punto de ebullición se le añadió el 1 % de hidróxido de calcio de grado alimenticio ($Ca(OH)_2$), de la marca de MASECA y se revolvió, se agregó 1 parte de maíz azul y se dejó hervir durante 30 min. Se mantuvo en reposo durante 8 h, al término del reposo retiro el nejayote, y con 2 partes de agua se enjuago el nixtamal.

El nixtamal se macero en un molino de piedras (FUMASA, mod. US-25) para la obtención de masa. La masa se esparció en una tarja y se secó en un horno a 60° C por 6 h. La masa seca recibió una segunda molienda en un molino eléctrico. Se tomaron 300 gr de la MDMA y se cribaron en malla #40. Se almaceno la harina en bolsa de plástico y se dejó en refrigeración para su posterior análisis.

8.5. Análisis de propiedades fisicoquímicas de las harinas

8.5.1 Determinación de humedad

Para la determinación de humedad se hizo uso del termobalanza UCLA-MA. Se añadió entre 1.5 y 2.0 gramos de muestra a la charola del equipo; la termo balanza elevó gradualmente la temperatura a 120 °C. Termino cuando la muestra mantuvo un peso constante, y mostro los resultados en porcentaje en la pantalla.

8.5.2 Determinación pH

El pH de las muestras se determinó según el método de AOAC (2000). Se mezcló 10 g de muestra con 100 mL de agua destilada. La mezcla se dejó reposar durante 15 minutos, agitando cada 5 minutos. El pH del filtrado se midió utilizando un medidor de pH (HANNA®-HI 2211, CDMX, México).

8.5.3 Viscosidad

Los perfiles de gelatinización de las harinas se evaluaron utilizando un reómetro Anton Paar modelo MCR 101 (Austria). Se disolvieron 3 g de la muestra en 18 mL de agua destilada. Las mediciones se realizaron por duplicado, registrando la viscosidad (cP), temperatura de la muestra (°C) y tiempo (min) de manera automática, según la metodología descrita por Castro-Campos et al., (2021). La temperatura inicial de 50 °C se mantuvo durante un minuto, tras lo cual se incrementó hasta 92 °C con una velocidad de calentamiento de 5.6 °C/min. Una vez alcanzada la temperatura especificada, se mantuvo durante 5 minutos. Posteriormente, se realizó el enfriamiento a la misma velocidad de calentamiento hasta alcanzar una temperatura de 50 °C. La temperatura final se mantuvo durante 2 minutos. Las curvas de gelatinización se emplearon para determinar los siguientes parámetros: temperatura de gelatinización (Tpasting), viscosidad máxima (Vmax), viscosidad mínima (Vmin) y viscosidad final (Vfinal).

8.5.4 Índice de absorción de agua

El índice de absorción de agua (IAA) se determinó de acuerdo con la metodología descrita por Contreras-Jiménez et al., (2014) y Dossou, (2014). Brevemente, se agregó aproximadamente 1.25 g de la muestra en base seca (se utilizó un cálculo para considerar el % de humedad), en un tubo de polipropileno y se mezcló con 20 mL de agua destilada, luego

se incubo en un baño maría a 30 °C durante 30 minutos con agitación constante. Las muestras se centrifugaron a 3000 rpm durante 10 minutos. El sobrenadante se colocó en bandejas de metal (peso constante) y se llevó a un horno de secado a 105 °C durante 24 horas y se pesó, considerando el residuo seco. De igual manera, se pesó el pellet remanente en el tubo. Estas técnicas se realizarán por duplicado. Finalmente, se utilizó la ecuación 4 para calcular el IAA.

$$IAA = \frac{Peso\ del\ pellet\ (g)}{peso\ de\ la\ muestra\ (g)} - \ Residuo\ seco\ (g) \qquad \textbf{Ec. 4}$$

8.5.5 Capacidad de absorción de agua y aceite

Las capacidades de absorción de agua (CAAg) y aceite (CAAc) de la harina se determinaron como se ha informado previamente por Chandra, (2013) con algunas modificaciones. Aproximadamente 1 g de muestra (se utilizó un cálculo para considerar el % de humedad), se mezcló con 10 mL de agua destilada o aceite de maíz en tubos de centrifuga graduados de 15 mL y luego se agito en un mezclador vortex durante 30 segundos. La mezcla se centrifugo a 3000 rpm durante 15 minutos y el sobrenadante se decantó cuidadosamente. Finalmente, se utilizó las ecuaciones 7 y 8 para calcular CAAg y CAAc, respectivamente.

$$CAAg\ (\%) = \frac{Peso\ de\ agua\ absorbida\ (g)}{Peso\ de\ harina\ (g)}\ x\ 100 \qquad \textbf{Ec. 5}$$

$$CAAc\ (\%) = \frac{Peso\ de\ aceite\ absorbido\ (g)}{Peso\ de\ harina\ (g)}\ x\ 100 \qquad \textbf{Ec. 6}$$

IX. Resultados y discusión

9.1. Limpieza y caracterización de la muestra

Se inició la preparación de la muestra de maíz azul con una limpieza y caracterización, con el objetivo de determinar las variaciones, la dureza y el tamaño que pueda tener el grano de maíz azul, propiedades que tienen un impacto directo con el porcentaje de cal que se va a requerir para la nixtamalización del maíz (Chimimba et al., 2019*).*

Durante la limpieza de los granos, se obtuvo un 3 % de granos quebrados y un 6.25 % de granos dañados, manteniendo un 90.75 % de grano limpio y apto para la experimentación.

Para la determinación del tamaño de los granos y la dureza se realizaron los respectivos análisis mencionados en la sección 8.3, y se compararon los resultados con las Tablas 10-12. La determinación se realizó con 5 repeticiones, y los resultados se expresan en la Tabla 13. De igual forma, se obtuvieron los resultados de la dureza del grano con base en la determinación del índice de flotación y del peso hectolítrico.

Tabla 13. Caracterización del grano de maíz azul.

Peso 100 granos (g)		**Peso hectolítrico (g)**		**Índice de flotación**	
33.1140	Medianos	49	Suave	100	Muy suave
33.1535	Medianos	49	Suave	100	Muy suave
36.2495	Medianos	49	Suave	99	Muy suave
35.1244	Medianos	49	Suave	100	Muy suave
33.0477	Medianos	49	Suave	100	Muy suave

La dureza del maíz azul coincide con la literatura revisada, posicionando al grano como suave, y estableciendo de esta manera la necesidad mínima de la cantidad de cal para el reblandecimiento del pericarpio en la cocción de la solución alcalina. Esta suavidad característica del grano podría favorecer una mayor absorción de agua y modificar la gelatinización del almidón durante la nixtamalización, repercutiendo en las propiedades funcionales de la harina obtenida, esto significa que el almidón del endospermo harinoso (suave) tiene mayor cristalinidad, entalpía de gelatinización, resistencia a la hidrólisis enzimática y menor contenido de almidón dañado. El almidón del endospermo harinoso es

indicado para la preparación de materiales con alta resistencia al calentamiento y a la hidrólisis (Timm et al., 2020).1

9.2. Gage R&R

Con el objetivo de evaluar la reproducibilidad del proceso experimental, se realizó un estudio de Gage R&R tipo 1 considerando un solo analista, con la finalidad de determinar la variabilidad asociada a la repetición del procedimiento de nixtamalización bajo las mismas condiciones operativas. Para ello, se llevaron a cabo tres nixtamalizaciones en días distintos, manteniendo constantes las condiciones de proceso: 25 minutos de cocción, 12 horas de reposo y 5 horas de secado. Posteriormente, se determinó como variable de respuesta la viscosidad máxima de las muestras de MDMA obtenidas.

De los datos experimentales obtenidos se realizó un análisis de varianza cruzado (ANOVA), cuyos resultados se exponen en la Tabla 14. Durante el análisis se evaluó la variación atribuible a las partes (corridas experimentales) y la variación asociada a la repetibilidad del método. El valor de F obtenido (0.0238) y el correspondiente valor de probabilidad ($p = 0.977$) indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las mediciones realizadas.

Tabla 14. ANOVA de reproducibilidad.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Parte	2	1644	822.2	0.0238	0.177
Repetibilidad	3	103811	34603.7		
Total	5	105455			

Dado que el valor de p es mayor que el nivel de significancia establecido ($\alpha = 0.05$), no se rechaza la hipótesis nula, la cual establece que todas las medias son estadísticamente iguales. Este resultado sugiere que la variabilidad observada en la viscosidad máxima de las MDMA no se debe a diferencias sistemáticas entre las corridas experimentales, sino que corresponde principalmente a variación aleatoria inherente al proceso de medición.

En términos metodológicos, estos resultados indican que el método experimental presenta una adecuada reproducibilidad, ya que la medición realizada por el mismo analista en

diferentes días bajo condiciones controladas no genera diferencias significativas en la variable de respuesta. Por lo tanto, se puede considerar que el procedimiento experimental empleado para la obtención y análisis de las MDMA es consistente y confiable para la evaluación de la viscosidad máxima dentro de las condiciones establecidas.

9.3. Propiedades fisicoquímicas

La cronología que se llevó a cabo para el proceso de experimentación se llevó a cabo durante 8 semanas, entre nixtamalizaciones y análisis; primeramente se seccionaron los 20 experimentos (propuestos por el diseño de superficie de respuesta, creado en la sección 8.2, descrito en la Tabla 9) en 5 por semana, durante la primera y la segunda semana se realizaron los primeros 10 experimentos, en la tercera y la cuarta semana se analizaron las harinas creadas en las dos semanas previas, para la quinta y la sexta semana se desarrollaron los 10 experimentos faltantes, y se analizaron esas harinas en la séptima y octava semana.

Los resultados de los experimentos se encuentran desglosados en la Tabla 15, donde se muestran los resultados promedio de cada propiedad tecno-funcional, junto con la desviación estándar de las réplicas que se analizaron. En conjunto con los resultados, se encuentran letras que nos indican el uso de la prueba de Tukey. Este análisis se realizó post hoc, utilizado consecutivamente tras un ANOVA, que comparó todas las medias de tratamientos y determinó la diferencia estadística significativa. La prueba de Tukey controla la tasa de error tipo I, siendo más fiable que múltiples pruebas t para encontrar diferencias específicas.

Los puntos centrales del diseño central compuesto, 3, 5, 8, 12, 14 y 17, fueron incluidos en el diseño experimental con el propósito de evaluar posibles efectos cuadráticos de las variables independientes dentro del modelo de superficie de respuesta. Las variables estudiadas fueron tiempo de cocción, tiempo de reposo y tiempo de secado, parámetros relevantes dentro del proceso de nixtamalización. Los puntos axiales permiten explorar regiones extremas del espacio experimental y, por lo tanto, contribuyen a identificar posibles curvaturas en la respuesta del sistema. Se realizó un ANOVA en la Tabla 16 para medir las medias de los puntos centrales, donde se verifica que no existe diferencia estadística ($p > 0.05$), y se acepta la hipótesis nula: todas las medias son iguales.

Tabla 15. Resultados de las propiedades tecno-funcionales de las MDMA.

	Humedad	pH	Viscosidad Max	IAA	CAAg	CAAc
	%	---	cP	G	%	%
M1	7.58 ± 0.13 ab	8.39 ± 0.04 c	4213 ± 117 e	3.08 ± 0.06 ab	1.58 ± 0.03a	0.73 ± 0.01 bcde
M2	6.80 ± 0.17 cd	7.50 ± 0.01 h	4428 ± 72 de	2.96 ± 0.03 bcd	1.46± 0.05a	0.72 ± 0.01 bcdef
M3	6.39 ± 0.42 defgh	8.08 ± 0.01f	4523 ± 310 cde	3.05 ± 0.01 ab	1.64± 0.11a	0.73 ± 0.00 bcde
M4	6.96 ± 0.17 bcd	8.83 ± 0.04 a	5038 ± 426 abcd	2.93 ± 0.03 bcd	1.53± 0.12a	0.76 ± 0.02 ab
M5	6.33 ± 0.00 defghi	8.12 ± 0.01 ef	4709 ± 257 bcde	2.98 ± 0.06 abcd	1.57± 0.17a	0.73 ± 0.01bcde
M6	5.87 ± 0.17 fghi	8.07 ± 0.01 f	4734 ± 6 bcde	2.94 ± 0.01 bcd	1.38± 0.03 a	0.66 ± 0.02 gh
M7	7.80 ± 0.13 a	7.86 ± 0.02 g	4689 ± 168 bcde	2.87 ± 0.12 cde	1.46± 0.03a	0.73 ± 0.00 bcde
M8	6.54 ± 0.16 cdefg	8.09 ± 0.01 f	4660 ± 141 bcde	2.98 ± 0.01 abcd	1.35 ± 0.03 a	0.72 ± 0.07 cdef
M9	6.58 ± 0.13 cdef	8.57 ± 0.06 b	4190 ± 187 e	2.99 ± 0.01abcd	1.60± 0.13 a	0.70 ± 0.07 efg
M10	6.63 ± 0.27 cde	8.71 ± 0.01 a	4824 ± 50 e	2.88 ± 0.01 cde	1.52 ± 0.08a	0.66 ± 0.01 h
M11	7.16 ± 0.00 abc	7.36 ± 0.01 i	4631 ± 68 bcde	3.13 ± 0.02 a	1.37± 0.02 a	0.69 ± 0.01 fgh
M12	6.53 ± 0.19 cdefg	8.11 ± 0.01 ef	5068 ± 52 abcd	3.03 ± 0.02 abc	1.39± 0.09a	0.73 ± 0.00 bcde
M13	7.06 ± 0.02 bcd	8.285 ± 0.06 cd	4832 ± 108 bcde	2.95 ± 0.00 bcd	1.45 ± 0.0944 a	0.71 ± 0.01 def
M14	6.76 ± 0.28 cde	8.135 ± 0.04 ef	5142 ± 62 abc	2.94 ± 0.02 bcd	1.4545 ± 0.0223 a	0.72 ± 0.00bcdef
M15	6.98 ± 0.13 bcd	8.025 ± 0.00707 f	5067 ± 214 abcd	2.83 ± 0.04 def	1.3858 ± 0.0100 a	0.75± 0.019 abcd
M16	5.73 ± 0.14 hi	7.43 ± 0.04 hi	5224 ± 71 ab	3.00 ± 0.00 abc	1.4670 ± 0.0095 a	0.78 ± 0.01 a
M17	6.05 ± 0.14 efghi	8.07 ± 0.01 f	5203 ± 175 abc	3.03 ± 0.02 abc	1.5932 ± 0.0807 a	0.73± 0.01 bcde
M18	5.79 ± 0.01 ghi	8.235 ± 0.05 de	4937 ± 80 abcd	2.88 ± 0.03 cde	1.6191 ± 0.0767 a	0.76 ± 0.00 abc
M19	5.75 ± 0.13 hi	8.08 ± 0.04 ff	5076 ± 112 abcd	2.76 ± 0.08 ef	1.5099 ± 0.1073 a	0.76 ± 0.00 abc
M20	5.60 ± 0.26 i	8.27 ± 0.01 cd	5526 ± 74 a	2.67 ± 0.00 f	1.4470 ± 0.0825 a	0.75 ± 0.01 abcd

Tabla 16. ANOVA de los puntos centrales del MSR.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Lotes	5	0.014916	0.002983	2.28	0.173
Error	6	0.007861	0.001310		
Total	11	0.022778			

Dentro de las interacciones, se observó una predominancia en los efectos cuadráticos. Lo que sugiere que las propiedades funcionales del maíz azul responden de manera no lineal a las modificaciones del proceso de nixtamalización. Este comportamiento indica que incrementos continuos en los tiempos de cocción, reposo o secado no producen cambios lineales sobre las respuestas evaluadas. Por otro lado, se desarrollaron regiones intermedias del proceso donde las propiedades alcanzan máximos o mínimos asociados al equilibrio entre fenómenos de hidratación, gelatinización parcial, reorganización molecular y retrogradación del almidón. Esta estabilidad sugiere que existe que el maíz azul posee una notable resiliencia tecnológica, de tal forma que sólo combinaciones específicas de procesamiento son capaces de modificar significativamente su funcionalidad.2

9.3.1. Determinación de humedad

La Figura 4 presenta los valores promedio de humedad de las masas deshidratadas de maíz azul (MDMA) correspondientes a los diferentes tratamientos evaluados en el diseño experimental, en los cuales se variaron los tiempos de cocción, reposo y secado durante el proceso de nixtamalización.

De manera general, se observa que los valores de humedad entre las distintas muestras presentan una dispersión relativamente baja, lo que sugiere una variabilidad limitada de la respuesta dentro del dominio experimental estudiado.

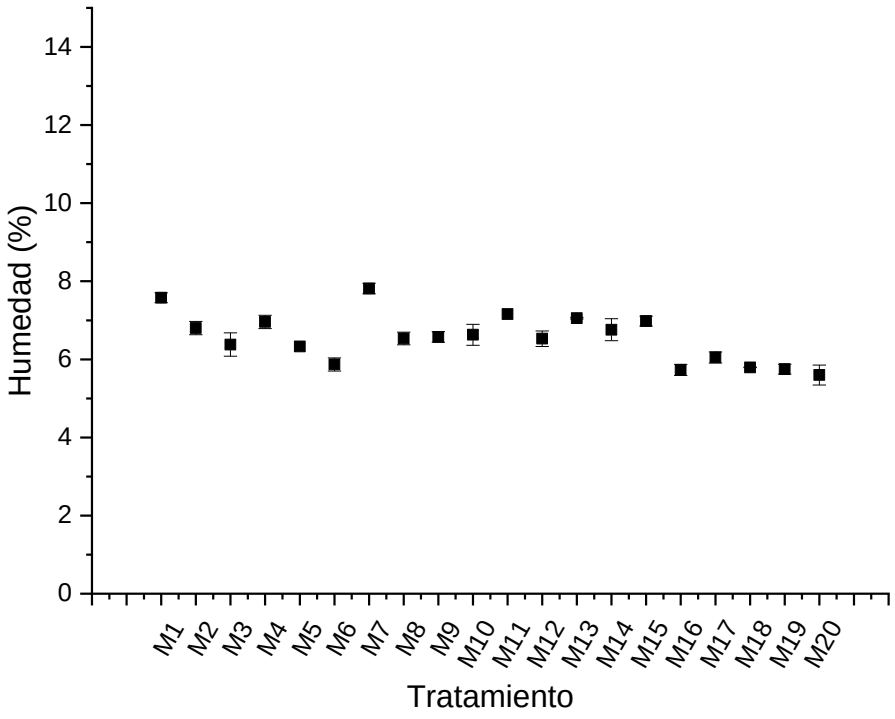


Figura 4. Resultados del porcentaje de humedad en los 20 tratamientos del MSR.

Todos los valores de humedad tuvieron en común una temperatura de 60°C, y al no existir una diferencia entre los resultados a pesar de la diferencia en los tiempos de secado, esto podría significar que parte de la resiliencia en la tecnología del almidón del maíz azul se encuentra en liberar humedad a una cierta temperatura que se mantiene constante en el tiempo. De ser asi, marcaria una ventaja industrial clave, donde la variable a mantener seguiría siendo la temperatura y solo se tendría que encontrar el tiempo donde esta se empiece a mantener, sin necesidad de largos tiempos de secado. 3

Es importante resaltar que todos los valores de humedad obtenidos se encuentran por debajo del límite máximo establecido por la *NOM-247-SSA1-2008*, (2008), la cual establece un contenido de humedad inferior al 15 % para harinas destinadas al consumo humano. Esto indica que, independientemente de las condiciones evaluadas, las MDMA cumplen con los criterios normativos de calidad e inocuidad.

9.3.2. Determinación del pH

El resultado de pH obtenido en las MDMA por los distintos tiempos de cocción, reposo y secado se muestran en la Figura 5.

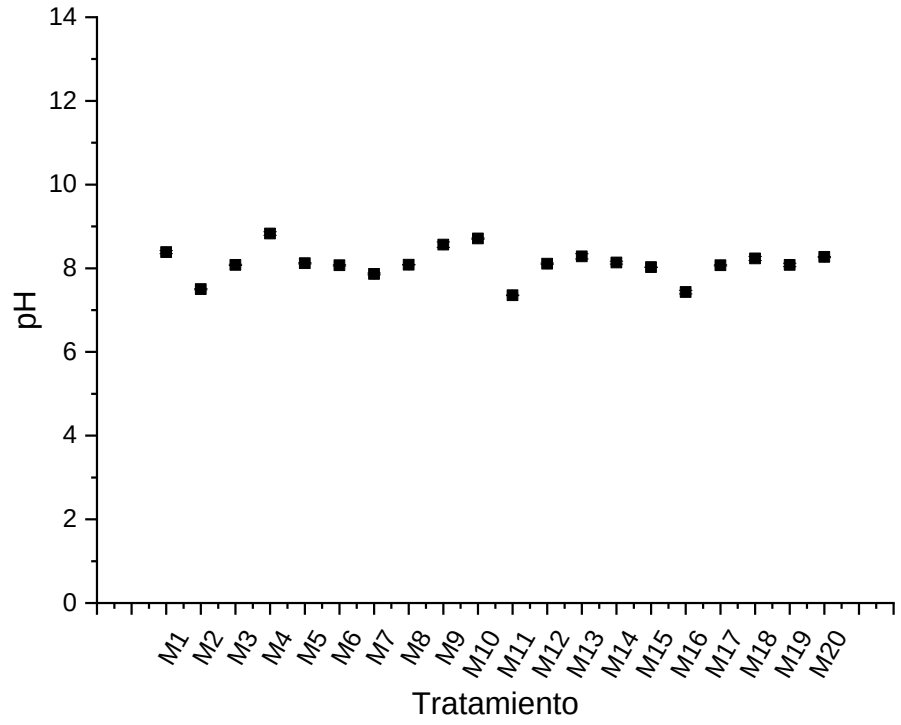


Figura 5. Resultados del pH en los 20 tratamientos del MSR.

Los valores más alcalinos resultaron en los experimentos 4, 9 y 10, con valores de 8.83, 8.57 y 8.71, se obtuvieron con tiempos de reposo de 24, 15 y 30 horas, respectivamente. Por el contrario, los resultados con la alcalinidad más baja fueron con un pH de 7.50, 7.36 y 7.43, para los experimentos 2, 11 y 16 respectivamente, obtenidos de tiempos de reposo de 1 hora para el experimento 2 y 6 horas para los experimentos 11 y 16. Esto concuerda con la información de Arámbula Villa et al., (2001b) donde se determinó que tiempos prolongados de exposición al agua con hidróxido de calcio tienen mejor absorción de calcio dentro de las masas nixtamalizadas, el tiempo de reposo es el momento donde existe una mayor absorción de agua dentro del grano y la gelatinización se desarrolla con mayor porcentaje; el hidróxido de calcio, considerado como una base fuerte, llegando a tener un pH de 14, al ser absorbidos

por los granos de maíz, provoca que la mezcla se presente con niveles de alcalinidad más altos.

El calcio cumple un papel fundamental en el proceso de la nixtamalización, su presencia ayuda al ablandecimiento del grano durante la cocción y el reposo, tiempos en los que la misma cal está siendo absorbida dentro del grano (5.2), lo que eleva el valor nutricional de los productos, mantiene en control la actividad microbiana, provoca un aroma, color y sabor específicos de la masa y apoya en prolongar los tiempos de anaquel. La relacion que crea entre el hidróxido de calcio y los componentes del grano son los responsables de las características fisicoquímicas y sensoriales de los productos elaborados a partir de la MDMA; el calcio se introduce dentro del grano de maíz durante la nixtamalización, enlazándose con el almidón y elevando hasta tres veces la cantidad de calcio unido al almidón (Castillo et al., 2009). Valores de pH encima de 9 provoca que la masa se sienta terrosa y con una sensación astringente al paladar, mientras que un pH menor a 6.5 podria suponer la presencia de bacterias, y tampoco caracteriza el sabor típico de masa nixtamalizada. 4

9.3.3. Viscosidad

A partir de los resultados obtenidos durante la experimentación de los tratamientos de las MDMA, la propiedad tecno-funcional de la viscosidad se muestra en la Figura 6. Los perfiles de viscosidad de las MDMA, obtenidos bajo diferentes condiciones de tiempo de cocción, reposo y secado, mantuvieron la curvatura típica de sistemas ricos en almidón. Asimismo, se incluye el perfil térmico aplicado durante el análisis, el cual permite evaluar el comportamiento reológico del almidón en función de la temperatura. Al ser puntos de control, los puntos centrales (3, 5, 8, 12, 14 y 17) fueron eliminados del perfil de viscosidad.

En términos generales, todas las muestras presentan un comportamiento típico de gelatinización del almidón, caracterizado por tres etapas principales: incremento inicial de la viscosidad, caída o ruptura del pico viscoso, y posterior incremento durante el enfriamiento. Con este comportamiento se infiere que independientemente de las condiciones de proceso, las MDMA conservan la capacidad de desarrollar estructuras viscosas características de sistemas ricos en almidón.

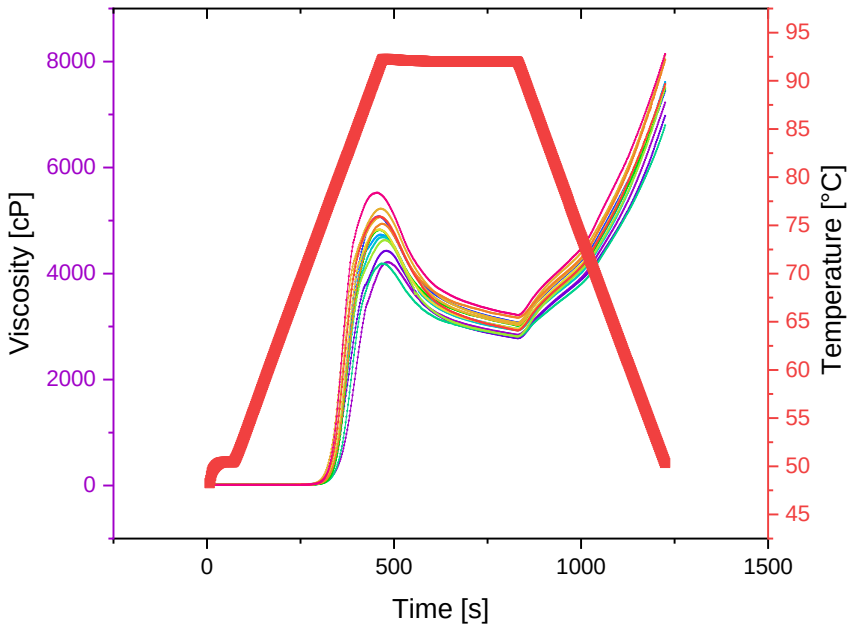


Figura 6. Perfil de viscosidad para los 20 tratamientos de MDMA.

De acuerdo con la curva de viscosidad, se distinguen temperaturas que provocan un cambio en el comportamiento del almidón, y la ubicación de esos puntos de quiebre se leen en los valores de la viscosidad durante la prueba reológica, estos son; viscosidad inicial (Vini), corresponde al valor con el que empieza el análisis, previo al incremento de la temperatura; viscosidad máxima (Vmax), es el valor más alto de viscosidad alcanzado durante la etapa de calentamiento, refleja la máxima capacidad de hinchamiento de los gránulos de almidón antes de su ruptura, y está directamente relacionada con el grado de gelatinización; viscosidad mínima (Vmin), se registra después del pico máximo, durante la etapa de mantenimiento a alta temperatura; viscosidad final (Vfin), es el valor de viscosidad obtenido al final del enfriamiento; breakdown (quebrado), se establece como la diferencia entre la viscosidad máxima y la viscosidad mínima; temperatura de pasta, es la temperatura a la cual se inicia el incremento significativo de la viscosidad.

La temperatura de gelatinización está directamente relacionada con la concentración de hidróxido de calcio, asi como del tiempo de cocción, entre mayor sean sus valores es más

alta el valor de la temperatura, que se expresa en la viscosidad máxima. Mientras que la temperatura de pastificado es la que actúa como un indicativo de la temperatura mínima requerida para cocer la harina, en la curva de viscosidad se encuentra en donde rompe la viscosidad inicial. Un aumento en la temperatura de pastificado indica que el gránulo de almidón se protege durante el procesamiento debido a un rearreglo estructural de la molécula de almidón. El obtener temperaturas de pastificado altas, revela el requerimiento de mayor energía para calentar y modificar los gránulos de almidón que se encuentren intactos. La Vmax es inversa a la relación con el grado de gelatinización de los almidones, el almidón gelatinizado no desarrolla viscosidad. La Vmax está linealmente asociada a la Vmin, y con el grado de hinchamiento de los gránulos de almidón durante el calentamiento. La viscosidad final (Vfin) tiene alta incidencia por la temperatura en su término lineal, desarrollando valores más altos de Vfin en aquellas muestras con mayor valor de Vmax, es durante el descenso de la temperatura de la muestras que se lleva a cabo una reasociación de las moléculas de almidón, especialmente entre las cadenas de amilosa, resultando en la formación del gel y de esta manera una elevación en los resultados de Vfin, y en similitud con la bibliografía, altos valores de Vfin reflejan una gran cantidad de amilosa lixiviada (Castillo et al., 2009).

Durante el secado, vuelve a existir una influencia térmica para el almidón, por lo que tiene un efecto directo sobre la calidad de la MDMA, el cuidado sobre la temperatura es importante, ya que al ser mayor de 60°C se modifica la estructura de los gránulos de almidón, dándoles rigidez, reduciendo la capacidad de hinchamiento y la solubilidad en agua durante la gelatinización. Esto tiene como resultado un efecto directo en las propiedades de gelatinización con la reducción de la viscosidad máxima y la degradación, y el aumento de la retrogradación. Este aumento de la temperatura de secado reduce la solubilidad de las proteínas del maíz, aumentando consecuentemente la interacción almidón-proteína, lo que reduce el rendimiento de extracción de almidón. Altas temperaturas provoca un aumento en la temperatura de gelatinización de los gránulos de almidón, así como en una reducción del rendimiento de extracción de almidón, la pureza del almidón y la entalpía de gelatinización (Timm et al., 2020).

En conjunto, estos parámetros permiten evaluar de manera integral el comportamiento funcional del almidón presente en las MDMA, así como su respuesta frente a diferentes condiciones de procesamiento. Los resultados de cada tratamiento se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Análisis del comportamiento reológico de las MDMA.

	Visc. Inicial cP	**Visc. Máx.** cP	**Visc. Mín.** cP	**Visc. Final** cP	**Viscosidad retrogradación** cP	**Breakdown** cP	**Temp. de pasta** °C
M1	15	4212	2844	7224	4381	1368	73.71
M2	15	4427	2779	6973	4195	1649	71.17
M3	14	4593	2979	7398	4418	1613	72.01
M4	13	5076	3075	7445	4370	2001	72.44
M5	13	4709	2993	7564	4571	1716	73.71
M6	11	4733	2955	7613	4658	1779	72.66
M7	14	4686	2929	7586	4657	1757	72.01
M8	12	4659	2921	7551	4630	1739	73.08
M9	13	4189	2815	6794	3980	1374	72.87
M10	12	4824	3015	7486	4471	1809	73.5
M11	12	4630	2811	7508	4697	1819	72.01
M12	11	5067	2880	7656	4776	2187	72.66
M13	12	4831	2955	7549	4594	1877	72.44
M14	11	5137	3006	7984	4978	2131	72.44
M15	12	5067	3029	8040	5011	2038	72.66
M16	12	5224	3067	8123	5056	2157	71.8
M17	12	5199	3091	7987	4896	2108	72.44
M18	13	4937	3166	8029	4863	1771	72.44
M19	11	5076	2923	7571	4648	2153	71.59
M20	12	5524	3215	8142	4927	2309	72.66

Como método de corroboración, se hizo uso del análisis de medias para evaluar el efecto de los tiempos de cocción, reposo y secado sobre la viscosidad máxima de las MDMA, el cual se presenta en la Tabla 18.

Tabla 18. ANOVA de la viscosidad máxima de la MDMA.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	1987021	220780	2.13	0.059
Lineal	3	361935	120645	1.16	0.340
Cocción	1	41495	41495	0.40	0.532
Reposo	1	295496	295496	2.85	0.102
Secado	1	21021	21021	0.20	0.656
Cuadrado	3	302136	100712	0.97	0.419
Cocción*Cocción	1	40927	40927	0.39	0.535
Reposo*Reposo	1	101099	101099	0.97	0.331
Secado*Secado	1	158370	158370	1.53	0.226
Interacción de 2 factores	3	937589	312530	3.01	0.045
Cocción*Reposo	1	763876	763876	7.36	0.011
Cocción*Secado	1	56406	56406	0.54	0.467
Reposo*Secado	1	117306	117306	1.13	0.296
Error	30	3112007	103734		
Falta de ajuste	5	1708943	341789	6.09	0.001
Error puro	25	1403064	56123		
Total	39	5099028			

Con respecto al valor del modelo global, no es significativo ($p > 0.05$); el modelo no puede explicar variación estadísticamente significativa de la viscosidad. En los efectos lineales, las variables no tienen resultados con significancia estadística ($p > 0.05$). Por lo que se deduce que el efecto directo de las variables no produce una modificación directa a la viscosidad máxima de MDMA

Del mismo modo, durante las interacciones cuadráticas, existe falta de efecto entre variables, lo que se representa como posible falta de la existencia de curvatura en la respuesta de viscosidad máxima.

Contrario a lo anterior, la interacción de dos factores resultó significativa ($p = 0.045$), lo que indica que la viscosidad no depende exclusivamente de los efectos individuales de las variables, sino de la combinación entre ellas. Dentro de estas interacciones, destaca específicamente la interacción cocción*reposo, la cual presentó un efecto altamente significativo ($p = 0.011$). Este resultado evidencia que el efecto del tiempo de cocción sobre la viscosidad está condicionado por el nivel del tiempo de reposo, reflejando un comportamiento dependiente y no aditivo entre ambos factores. Las interacciones cocción x secado y reposo x secado no presentan efecto sobre los resultados.

Continuando con la lectura del ANOVA, se aprecia que existe una falta de ajuste significativa (p = 0.000), lo que indica que el modelo no describe completamente la variabilidad experimental de los datos. Además, el R^2 tiene un valor de 38.97 %; esto puede deberse a la presencia de otros efectos no considerados o a una relación más compleja entre las variables y la respuesta. Sin embargo, el modelo aún permite identificar tendencias importantes y los factores con mayor influencia sobre el índice de absorción de agua.

A raíz de la falta de ajuste observada en la Tabla 18, se optó por realizar un tratamiento adicional de los datos correspondientes a los puntos centrales (muestras 3, 5, 8, 12, 14 y 17). Para ello, los valores obtenidos en dichos tratamientos fueron promediados y posteriormente integrados como una sola observación representativa, identificada como la muestra 3. Esta estrategia permite disminuir la variabilidad experimental asociada a los puntos centrales y evaluar nuevamente el comportamiento del modelo mediante análisis de residuos e influencia. En la Tabla 19 se muestran los resultados obtenidos mediante un ANOVA.

En conjunto, la unificación de los puntos centrales permitió mejorar la estabilidad del modelo y reducir parcialmente la variabilidad experimental; aumentó el R^2 a 55.34 % y el error disminuyó, obteniéndose un comportamiento más adecuado de los residuos y una mejor evaluación de los supuestos estadísticos del análisis de superficie de respuesta.

Sin embargo, el ANOVA indicó que el modelo de superficie de respuesta no fue estadísticamente significativo (p = 0.680), lo que sugiere que las variables no efectuaron un cambio notable sobre la viscosidad de las harinas de maíz azul dentro de los rangos del estudio.

En términos generales, los resultados muestran que la viscosidad presentó una respuesta relativamente estable frente a las condiciones de cocción, reposo y secado aplicadas en el diseño experimental. Desde el punto de vista tecnológico, la estabilidad observada en la viscosidad podría relacionarse con la resistencia estructural del almidón del maíz azul frente a las condiciones de procesamiento evaluadas, manteniendo relativamente constantes las propiedades de gelatinización y comportamiento reológico de las harinas obtenidas.

Tabla 19. ANOVA de viscosidad de la MDMA, puntos centrales unificadas.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	1025987	113999	0.69	0.705
Lineal	3	194514	64838	0.39	0.765
Cocción	1	29796	29796	0.18	0.689
Reposo	1	145973	145973	0.88	0.391
Secado	1	14552	14552	0.09	0.779
Cuadrado	3	145243	48414	0.29	0.830
Cocción*Cocción	1	1029	1029	0.01	0.940
Reposo*Reposo	1	48203	48203	0.29	0.613
Secado*Secado	1	66513	66513	0.40	0.554
Interacción de 2 factores	3	489928	163309	0.99	0.470
Cocción*Reposo	1	400438	400438	2.42	0.181
Cocción*Secado	1	23454	23454	0.14	0.722
Reposo*Secado	1	66036	66036	0.40	0.555
Error	5	827851	165570		
Total	14	1853838			

A pesar de que el ANOVA de viscosidad máxima indicó que no se desarrolló un efecto que fuera estadísticamente significativo ($p > 0.05$) de los efectos lineales, cuadráticos o de interacción, las superficies de respuesta mostraron regiones de incremento y disminución de la viscosidad. Por ello, las curvaturas observadas en las superficies (Figura 7) deben interpretarse únicamente como tendencias gráficas del modelo ajustado y no como evidencia concluyente de efectos reales de los factores estudiados sobre la viscosidad. Estas variaciones podrían estar asociadas a la variabilidad experimental y a la influencia de observaciones particulares dentro del diseño.

En la superficie correspondiente a la interacción entre cocción y reposo (Figura 7a), se observó que la viscosidad máxima tendió a incrementarse cuando se combinaron tiempos bajos de cocción con tiempos altos de reposo, alcanzando valores cercanos a 5600 cP. En contraste, los valores más bajos de viscosidad se presentaron en combinaciones de baja cocción y bajo reposo. Este comportamiento sugiere que el reposo podría favorecer procesos de hidratación y reorganización estructural del almidón, incrementando la viscosidad de la suspensión.

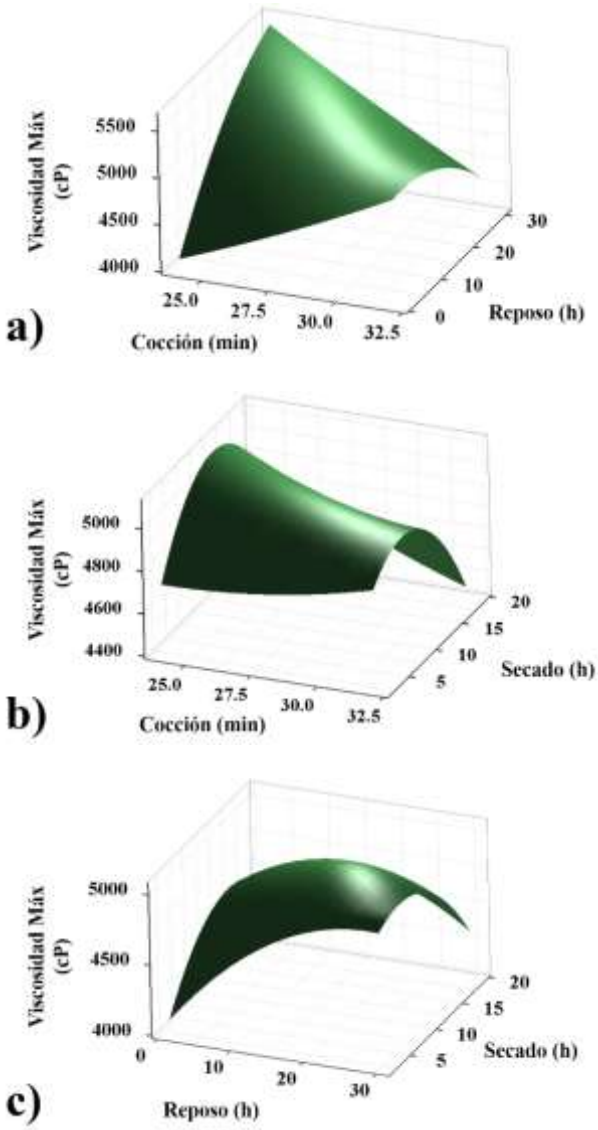


Figura 7. Gráficas de las superficies de respuesta de la viscosidad. a) Interacción cocción-reposo. b) Interacción cocción-secado. c) Interacción reposo-secado.

La superficie de interacción entre cocción y secado (Figura 7b) mostró una variación más moderada de la viscosidad. Los mayores valores se localizaron en tiempos bajos de cocción combinados con niveles intermedios de secado, mientras que tiempos de secado elevados tendieron a disminuir ligeramente la viscosidad. Asimismo, al incrementar el tiempo de cocción, la superficie mostró una tendencia relativamente estable, indicando que el efecto conjunto de ambas variables fue limitado.

Por otro lado, en la interacción entre reposo y secado (Figura 7c), la viscosidad presentó un incremento progresivo conforme aumentó el tiempo de reposo, alcanzando valores máximos alrededor de 5000 cP en combinaciones de reposo elevado y secado intermedio.

En general, las superficies de respuesta evidenciaron cambios graduales y relativamente suaves en la viscosidad, lo que coincide con los resultados del ANOVA. Esto indica que, aunque existen ciertas tendencias visuales en la respuesta, las variables evaluadas no generaron diferencias suficientemente grandes para modificar significativamente la viscosidad de las harinas de maíz azul dentro del intervalo experimental estudiado.
Las condiciones que produjeron mayores valores de viscosidad máxima permitieron conservar la integridad de los gránulos de almidón, favoreciendo su hinchamiento y capacidad de retención de agua durante el calentamiento. La ventaja tecnológica es disponer de harinas con mayor poder espesante, mejor cohesión y mayor rendimiento en la elaboración de tortillas.

A continuación, se realizó una gráfica de intervalos que realza los valores de viscosidad de cada experimento de manera visual, Figura 8. Existe un experimento que sobresale en su valor, que es el tratamiento M20 que tiene como variables de entrada: tiempo de cocción 25 minutos, tiempo de reposo 24 horas y tiempo de secado 15 horas. Este comportamiento sugirió que dicho tratamiento podría representar una condición favorable, se abre la posibilidad que se han encontrado los tiempos para los valores óptimos de viscosidad, reflejados en los resultados del experimento M20.

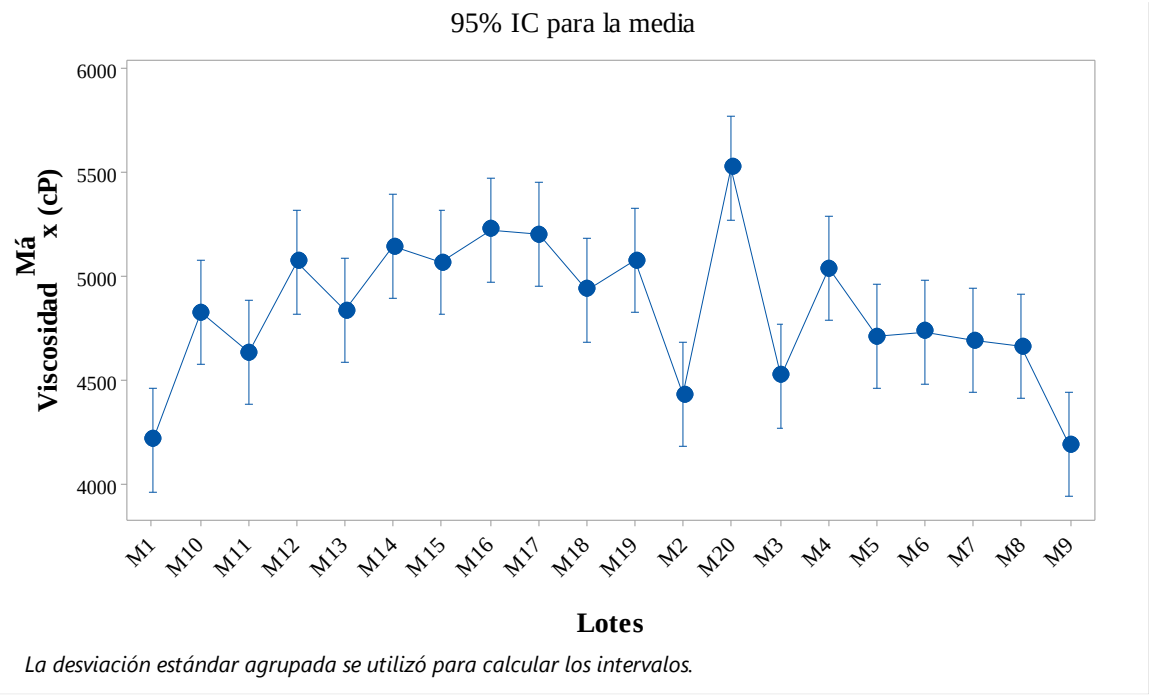


Figura 8. Gráfica de intervalos de viscosidad máxima (cP) vs. Experimentos.

Como método de comprobación, se realizó un análisis mediante la distancia de Cook (Figura 9) para ver si el comportamiento de M20 correspondía a una tendencia real del sistema o si ejercía una influencia desproporcionada sobre el modelo. En este análisis, M20 correspondió a la observación 15 y presentó el valor más alto de distancia de Cook, ubicándose cercano o ligeramente por encima del umbral de referencia.

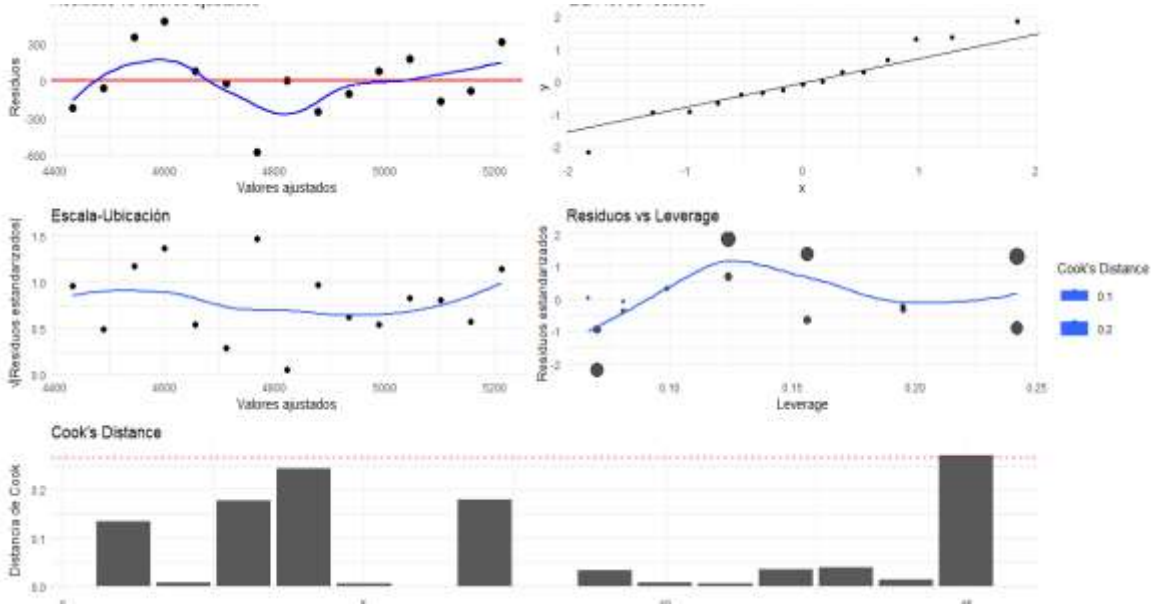


Figura 9. Distancias de Cook para los resultados de la viscosidad máxima.

El gráfico de "residuos vs leverage" mostró que la observación 15 combinó un leverage relativamente alto con residuos moderados, indicando que tuvo una influencia importante sobre el ajuste del modelo. Asimismo, en la gráfica de distancia de Cook se observó que esta observación destacó claramente respecto al resto de los datos experimentales, evidenciando un impacto considerable sobre los coeficientes estimados y sobre la forma de la superficie de respuesta.

Por otra parte, los gráficos de diagnóstico mostraron que los residuos se distribuyeron alrededor de cero sin patrones extremadamente severos, aunque la curva suavizada en residuos versus valores ajustados evidenció cierta tendencia no lineal. El gráfico Q-Q indicó una aproximación aceptable a la normalidad, con ligeras desviaciones en los extremos, mientras que la gráfica de escala-ubicación mostró una dispersión relativamente homogénea de los residuos estandarizados.

En conjunto, estos resultados sugieren que el tratamiento M20 podría representar una condición experimental con potencial para maximizar la viscosidad; sin embargo, su elevada influencia estadística indica que debe interpretarse con cautela. La alta distancia de Cook sugiere que este tratamiento tiene un peso importante en el comportamiento del modelo y que pequeñas variaciones en dicha observación podrían modificar considerablemente los

resultados del análisis. Por ello, sería recomendable validar experimentalmente esta condición mediante repeticiones adicionales antes de considerarla como un punto óptimo definitivo.

9.3.4. Índice de absorción de agua

La Figura 10 muestra el comportamiento del IAA del maíz azul sometido a los 20 tratamientos diseñados por la MSR. En general, los valores del IAA oscilaron aproximadamente entre 2.67 y 3.13 g gel/g, lo que indica variaciones moderadas en la capacidad de absorción de agua entre los tratamientos evaluados.

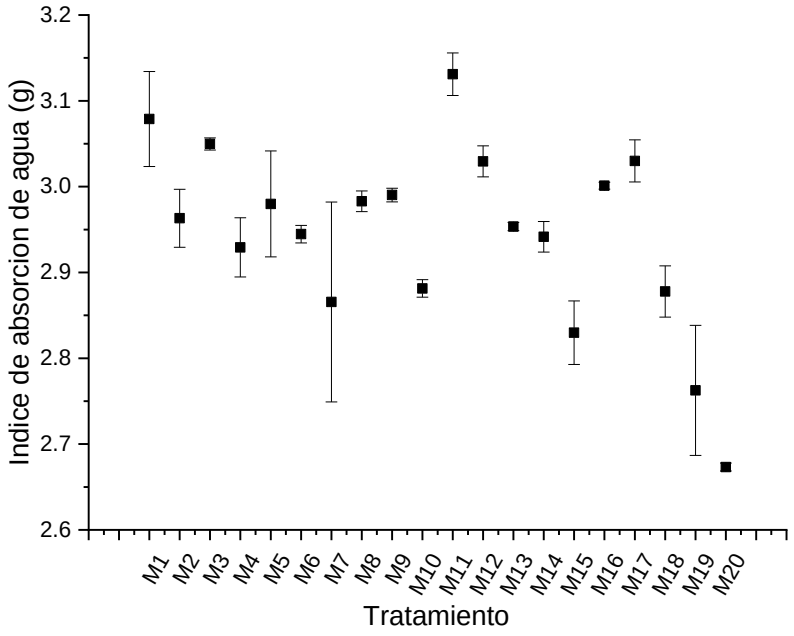


Figura 10. Resultados del índice de absorción de agua en los 20 tratamientos del MSR.

La presencia de valores más altos de IAA en los tratamientos sugiere una mayor capacidad de las harinas para retener agua, posiblemente debido a modificaciones estructurales en el almidón y otros componentes del grano ocasionadas por las condiciones de procesamiento. Contreras-Jiménez et al., (2014) reportan valores de IAA en harinas de maíz de entre 0.9 y 3.7 g gel/g; en comparación, los resultados de la harina de maíz azul indican una alta afinidad por el agua, debido a una mayor disponibilidad de grupos hidrofílicos. En las harinas, el

índice de absorción de agua es un indicativo que se relaciona con la capacidad de hidratación y con propiedades funcionales relevantes para la elaboración de productos como masas y tortillas.

En su mayoría, los tratamientos se concentraron en un intervalo estrecho, entre 2.0 y 3.0 g gel/g, esto podría sugerir que si bien hay tratamientos que si logran un efecto en la IAA, usualmente la propiedad tecno-funcional se mantiene estable antes las diferentes condiciones de tiempos durante la nixtamalización y su secado. En algunos casos, existe alta variabilidad entre el mismo tratamiento, como se ve en las barras de error, en los tratamientos M7 y M18, donde se aprecia una dispersión mayor, lo que indica una respuesta menos homogénea.

Se realizó un ANOVA de los valores resultantes del índice de absorción de agua con el fin de comprobar el efecto que pudieran tener los tiempos de cocción, reposo y secado. En la Tabla 20, se muestra que el modelo global es significativo (p = 0.001), el modelo explica variación estadísticamente significativa del IAA.

Tabla 20. ANOVA del índice de absorción del agua de la MDMA.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	0.276483	0.030720	4.61	0.001
Lineal	3	0.140065	0.046688	7.01	0.001
Cocción	1	0.056298	0.056298	8.45	0.007
Reposo	1	0.078453	0.078453	11.78	0.002
Secado	1	0.002019	0.002019	0.30	0.586
Cuadrado	3	0.056988	0.018996	2.85	0.054
Cocción * Cocción	1	0.051051	0.051051	7.66	0.010
Reposo*Reposo	1	0.004268	0.004268	0.64	0.430
Secado*Secado	1	0.006005	0.006005	0.90	0.350
Interacción de 2 factores	3	0.050058	0.016686	2.50	0.078
Cocción *Reposo	1	0.000423	0.000423	0.06	0.803
Cocción *Secado	1	0.043004	0.043004	6.46	0.016
Reposo*Secado	1	0.006630	0.006630	1.00	0.326
Error	30	0.199863	0.006662		
Falta de ajuste	5	0.150046	0.030009	15.06	0.000
Error puro	25	0.049817	0.001993		
Total	39	0.476346			

Con respecto a los efectos lineales, la variables de cocción y reposo muestran significancia estadística ($p < 0.05$), especialmente el reposo tiene mayor influencia ($p = 0.002$), esto se ve por su valor F (11.78) que es mayor a diferencia de la cocción. La capacidad de hidratación del almidón se ve afectada por los tiempos de reposo, por el contrario, los tiempos de secado no tienen impacto directo sobre el IAA.

Por otro lado, en las interacciones cuadráticas, existe efecto únicamente en cocción x cocción ($p = 0.10$), el resultado de significancia estadística en las interacciones cuadráticas revela la existencia de curvatura en la respuesta de IAA con respecto al tiempo de cocción. Esto puede ser interpretado a que el efecto de la cocción no fue completamente lineal y que existen niveles intermedios donde la absorción de agua puede maximizarse o disminuir. Por otra parte, los términos cuadráticos de reposo y secado no resultaron significativos.

Asimismo, en las interacciones entre factores, la interacción cocción x secado presente significancia estadística ($p = 0.016$), esto indica que la dependencia del efecto de la cocción sobre el IAA es hacia el nivel de secado aplicado. Por las demás interacciones, tienen efecto limitado, al grado de ser nulo.

Continuando con la lectura del ANOVA, se aprecia que existe una falta de ajuste significativa ($p = 0.000$), lo que indica que el modelo no describe completamente la variabilidad experimental de los datos. Esto puede deberse a la presencia de otros efectos no considerados o a una relación más compleja entre las variables y la respuesta. Sin embargo, el modelo aún permite identificar tendencias importantes y los factores con mayor influencia sobre el índice de absorción de agua.

Con el objetivo de disminuir la falta de ajuste observada en el MSR, al igual que en los resultados de viscosidad, se realizó un tratamiento adicional de los datos correspondientes a los puntos centrales (muestras 3, 5, 8, 12, 14 y 17) y se unificaron todos en un solo valor, representado en el tratamiento 3. Los resultados de muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. ANOVA de índice de absorción de agua de la MDMA, puntos centrales unificadas.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	0.119251	0.013250	0.92	0.571
Lineal	3	0.072343	0.024114	1.67	0.286
Cocción	1	0.031077	0.031077	2.16	0.202
Reposo	1	0.037431	0.037431	2.60	0.168
Secado	1	0.000632	0.000632	0.04	0.842
Cuadrado	3	0.009110	0.003037	0.21	0.885
Cocción*Cocción	1	0.004669	0.004669	0.32	0.594
Reposo*Reposo	1	0.000090	0.000090	0.01	0.940
Secado*Secado	1	0.000009	0.000009	0.00	0.981
Interacción de 2 factores	3	0.025029	0.008343	0.58	0.654
Cocción*Reposo	1	0.000212	0.000212	0.01	0.908
Cocción*Secado	1	0.021502	0.021502	1.49	0.276
Reposo*Secado	1	0.003315	0.003315	0.23	0.652
Error	5	0.071998	0.014400		
Total	14	0.191248			

Una vez realizada la unificación de los puntos centrales, se realizó nuevamente el ANOVA para el IAA. Los resultados mostraron que el modelo no fue estadísticamente significativo ($p = 0.571$), lo que indica que las variables de cocción, reposo y secado no tuvieron un efecto fuerte sobre el IAA dentro de las condiciones evaluadas.

El modelo presentó un aumento del coeficiente de determinación (R^2) de 62.35 %, lo que significa que el modelo logró explicar aproximadamente el 62 % de la variabilidad observada en el índice de absorción de agua. Aunque estadísticamente el modelo no fue significativo, este valor de R^2 indica que existe una capacidad moderada de explicación de la respuesta por parte de las variables estudiadas.

Con el objetivo de observar tendencias gráficas del modelo ajustado que tienen entre si las variables, se realizaron las superficies de repuesta para el índice de absorción de agua, esto de manera que, al verlo de forma visual, ayude a la interpretación de la interacción dentro de la región experimental evaluada (Figura 11).

En la gráfica que representa a la interacción entre cocción y reposo (Figura 11a), se observó que el IAA mantienen un comportamiento estable, con un ligero incremento en tiempos de

cocción de alrededor de 32 minutos y menos de 10 horas de reposo logrando valores cercanos a 3 %. En contraste, los valores más bajos de IAA se presentaron en combinaciones de baja cocción y alto reposo. Este comportamiento sugiere que la cocción podría favorecer procesos de hidratación, incrementando el IAA de la masa.

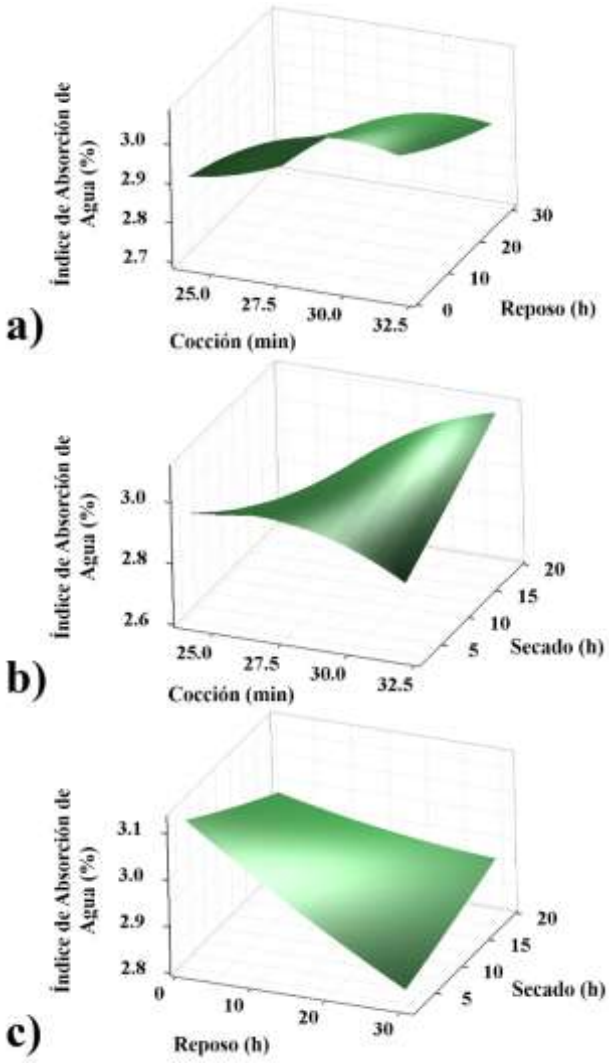


Figura 11. Gráficas de las superficies de respuesta del IAA. a) Interacción cocción-reposo. b) Interacción cocción-secado. c) Interacción reposo-secado.

En cambio, con la superficie de interacción entre cocción y secado (Figura 11b) se visualiza una notoria con respecto a los tiempos prolongados de secado y cocción alta, que se contrasta con tiempos prolongados de cocción y cortos de secado, o inversamente, con tiempos prolongados de secado y cortos de cocción, donde hay niveles de IAA menores

Por último, en la interacción entre reposo y secado (Figura 11c), el IAA presentó un incremento progresivo conforme tiempos de reposo de 10 a 20 minutos, alcanzando valores máximos alrededor de 3.1 % en combinación con secado ligero.

De la misma forma que el ANOVA ya había predicho, las superficies de respuesta no poseen drásticos cambios, y se mantienen en relativa continuidad, las variables afectan, pero no de manera significativa en la estadística. Lo que indica que, a pesar de haber tendencias visuales, las variables no aportan modificaciones con la importancia necesaria para modificar significativamente el IAA de las MDMA dentro del intervalo experimental estudiado.

Sin embargo, IAA fue sensible a las modificaciones en las condiciones de nixtamalización, al presentar efectos significativos asociados a los tiempos de cocción y reposo, así como un comportamiento cuadrático respecto al tiempo de cocción. Esta mayor sensibilidad puede atribuirse a que el IAA está directamente relacionado con la capacidad del almidón para captar y retener agua, propiedad que depende en gran medida del grado de gelatinización alcanzado durante el procesamiento.

Durante la cocción alcalina, el agua y el calor promueven la ruptura progresiva de las regiones cristalinas de los gránulos de almidón, permitiendo la exposición de grupos hidroxilo presentes en las moléculas de amilosa y amilopectina. Como consecuencia, aumenta la disponibilidad de sitios capaces de formar enlaces de hidrógeno con las moléculas de agua, favoreciendo el hinchamiento de los gránulos y el incremento del IAA. Sin embargo, cuando la intensidad del tratamiento térmico supera cierto umbral, pueden producirse fenómenos de desorganización excesiva de la estructura granular, lixiviación de componentes solubles y posteriores procesos de reasociación molecular durante el reposo y el secado, disminuyendo nuevamente la capacidad de hidratación. Este comportamiento explica la predominancia de efectos cuadráticos observados en el modelo ajustado y sugiere la existencia de tiempos intermedios de procesamiento en los que la absorción de agua es máxima.

Al realizar nuevamente las distancias de Cook, Figura 12, la mayoría de las observaciones presentaron valores bajos de distancia de Cook, indicando que no afectaron significativamente el comportamiento estadístico del modelo.

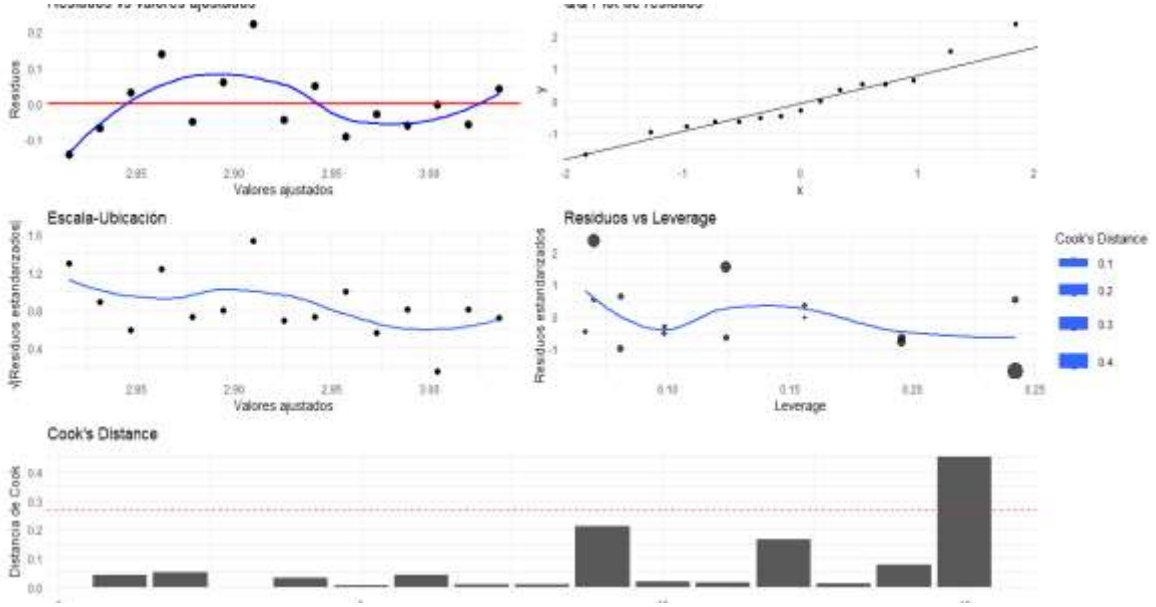


Figura 12. Distancias de Cook para los resultados del IAA.

Sin embargo, al igual que en el análisis de viscosidad, la observación 15 (tratamiento 20) volvió a destacar como el punto más influyente, ya que presentó el valor más alto de distancia de Cook y superó el umbral de referencia. Esto indica que dicha observación tuvo un efecto importante sobre los coeficientes del modelo y sobre la forma de la superficie de respuesta.

En el gráfico de residuos versus leverage, la observación 15 fue alto, confirmando que su combinación de valores experimentales tuvo una influencia considerable en el ajuste estadístico. A pesar de ello, los demás puntos se mantuvieron dentro de límites aceptables, sugiriendo que el modelo no estuvo afectado por múltiples observaciones extremas.

En conjunto, estos resultados indican que la observación 15 representó un punto experimental con fuerte influencia tanto para el IAA como para la viscosidad, por lo que sus resultados deben interpretarse con cautela y, de ser posible, validarse mediante repeticiones experimentales adicionales.

Desde una perspectiva tecnológica, la elevada sensibilidad del IAA representa una característica relevante para la formulación de productos alimentarios elaborados a partir de harinas de maíz azul. Una mayor capacidad de absorción de agua puede favorecer el rendimiento de la masa, reducir pérdidas durante el procesamiento y contribuir a obtener

productos con mayor suavidad, elasticidad y vida útil, particularmente en tortillas y otros productos nixtamalizados. Asimismo, harinas con valores adecuados de IAA podrían requerir menores ajustes en la adición de agua durante la formulación, facilitando la estandarización de procesos industriales y disminuyendo la variabilidad entre lotes de producción. En aplicaciones distintas a la tortilla, como mezclas para panificación, snacks expandidos o alimentos instantáneos, la capacidad de hidratación también puede influir sobre la textura, la aceptabilidad sensorial y la estabilidad del producto final, por lo que el control de esta propiedad constituye un criterio importante para el diseño y desarrollo de nuevos productos derivados del maíz azul.

9.3.5. Capacidad de absorción de agua

Los resultados de la CAAg con respecto a las modificaciones realizadas durante la nixtamalización en sus tiempos de cocción, reposo y secado se encuentran en la Figura 13.

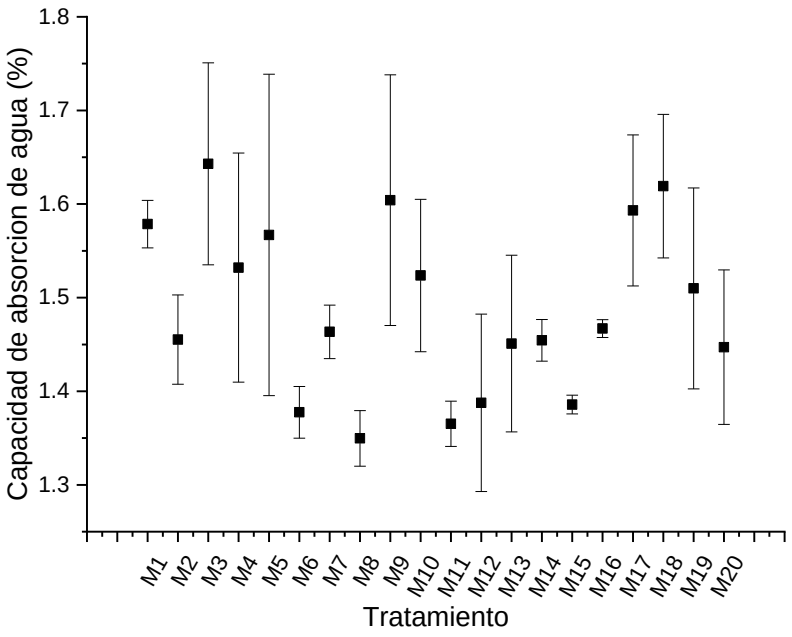


Figura 13. Resultados de la capacidad de absorción de agua en los 20 tratamientos del MSR.

El comportamiento del CAAg es observado durante los 20 tratamientos diseñados por la MSR. Se muestra que los valores oscilaron alrededor de 1.3 y 1.7 %, lo que implica

variaciones reducidas en la capacidad de absorción de agua entre los tratamientos evaluados. La presencia de valores más altos de CAAg en los tratamientos sugiere una mayor posibilidad de las harinas para retener agua en las moléculas de almidón, gracias a las modificaciones estructurales realizadas durante la nixtamalización.

Para el adecuado tratamiento de los datos, se evaluaran de manera similar a las propiedades anteriores, donde se unificarán los puntos centrales desde un inicio, con el fin de reducir la variabilidad que existe dentro del modelo, los resultados del ANOVA se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22. ANOVA de la capacitación de absorción del agua de la MDMA, puntos centrales unificadas.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	0.040944	0.004549	0.51	0.820
Lineal	3	0.017657	0.005886	0.66	0.611
Cocción	1	0.007004	0.007004	0.79	0.416
Reposo	1	0.008429	0.008429	0.95	0.375
Secado	1	0.001306	0.001306	0.15	0.717
Cuadrado	3	0.004066	0.001355	0.15	0.924
Cocción*Cocción	1	0.000914	0.000914	0.10	0.762
Reposo*Reposo	1	0.000140	0.000140	0.02	0.905
Secado*Secado	1	0.000714	0.000714	0.08	0.788
Interacción de 2 factores	3	0.020731	0.006910	0.78	0.556
Cocción*Reposo	1	0.011303	0.011303	1.27	0.311
Cocción*Secado	1	0.002234	0.002234	0.25	0.638
Reposo*Secado	1	0.007194	0.007194	0.81	0.410
Error	5	0.044526	0.008905		
Total	14	0.085470			

Los resultados del ANOVA explican la que el modelo no tuvo significancia estadística, pues al tener p = 0.820, indica que las variables analizadas dentro de los rangos donde fueron trabajadas no poseen un efecto representativo en la propiedad de la CAAg.

El coeficiente de determinación, con un 47.90 % predice de manera vaga la respuesta por parte de las variables estudiadas, esto podría deberse a que existieron variables que no fueron consideradas y de las que no se manejó un control y que afectaron al sistema.

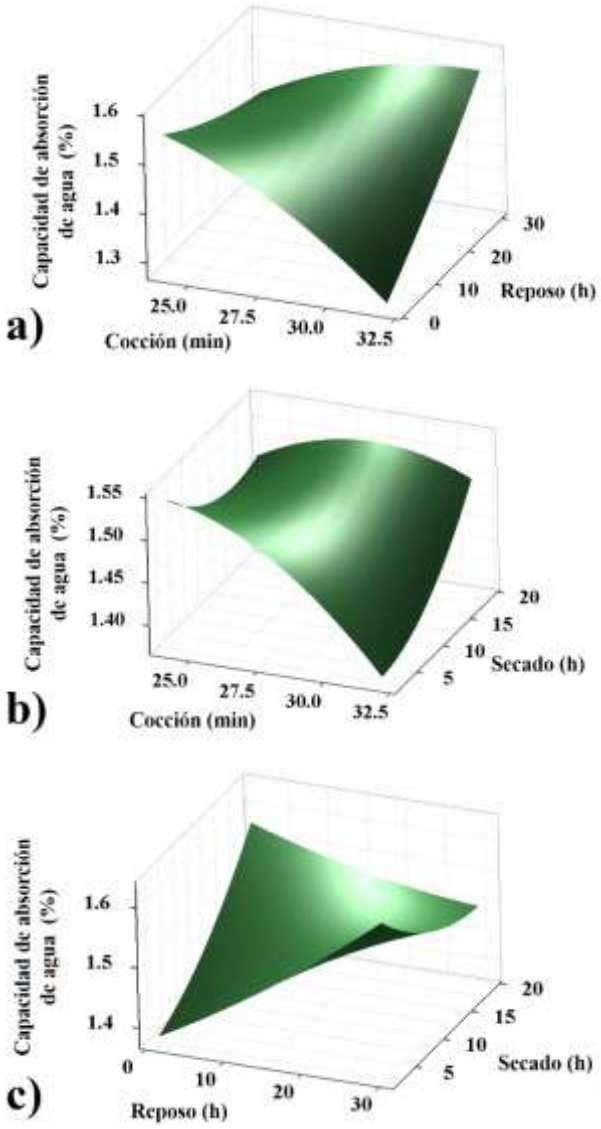


Figura 14. Gráficas de las superficies de respuesta del CAAg. a) Interacción cocción-reposo. b) Interacción cocción-secado. c) Interacción reposo-secado.

El modelo no muestra que las interacciones simples, cuadradas y entre dos factores tengan significancia estadística, por lo que se deduce que la propiedad se mantiene estable a través de las modificaciones sobre las que fue manejada la nixtamalización.

Para la demostración de las tendencias gráficas del modelo ajustado, se presenta a continuación la Figura 14, que revela la afectación que tiene la CAAg respecto a las variables de tiempos de cocción, reposo y secado.

En la gráfica que representa a la interacción entre cocción y reposo (Figura 14a), se observó que la CAAg mantiene valores más altos en un tiempo de cocción de 27 a 29 minutos, llegando a su punto álgido con 20 a 24 horas de reposo, y cayendo estrepitosamente con tiempos de cocción superiores a 30 y en cortos tiempos de reposo. El asunto de ver un comportamiento estable sobre especialmente el tiempo de cocción se vuelve a observar en la Figura 14b, lo que nos habla de que la mayor influencia de la CAAg se encuentra en el primer proceso térmico bajo el que es sometido, y en el que uso prolongado, mayor de 30 minutos, de este paso conlleva a disminuciones drásticas de valores.

Como última observación, en la interacción entre reposo y secado (Figura 14c), la CAAg presentó un incremento en la zona que convergen los tiempos de reposo de 10-20 horas, con

tiempos de secado de 15 a 20 horas. Bajo la observación de la importancia del tiempo de cocción entre 27 a 29 minutos, y aunado a los tiempos de reposo de 10 a 20 horas, y secado de 15 a 20, pudiera encontrarse el punto óptimo para CAAg.

Las condiciones que incrementaron la CAAg promovieron una gelatinización parcial del almidón y la exposición de grupos hidroxilo disponibles para interactuar con el agua, manteniendo al mismo tiempo una estructura suficientemente estable para resistir la centrifugación. La ventaja de seleccionar estas condiciones es producir harinas con mayor retención de humedad, mejor cohesividad de la masa y menor endurecimiento de las tortillas durante el almacenamiento.

Sin embargo, deberá de trabajarse más sobre los variables que no controlaron para poder tener un modelo que prediga de manera más robusta el diseño del modelo.

Desde una perspectiva tecnológica, el resultado de la CAAg indica la capacidad de la MDMA para retener agua en forma de gel se mantuvo estable frente a variaciones moderadas del proceso de nixtamalización. Esta estabilidad pudiera ser favorable para garantizar una mayor reproducibilidad del proceso industrial, ya que se registran pequeñas fluctuaciones operativas durante la producción, por lo que sería complicado comprometer el comportamiento funcional de la harina. Consecuentemente, la obtención de productos con características homogéneas es factible, y con menor sensibilidad a desviaciones propias del procesamiento, esto protege la consistencia en atributos relacionados con el rendimiento, la manipulación de la masa y la calidad del producto final.

9.3.6. Capacidad de absorción de aceite

La Figura 15 exhibe los resultados que se obtuvieron de la capacidad de absorción de aceite bajo la influencia de los tiempos de cocción, reposo y secado que se trabajó conforme al diseño del MSR. En su mayoría, los resultados se encuentran entre 0.70 a 0.75 %, existiendo valores que sobresalen como superior e inferiores.

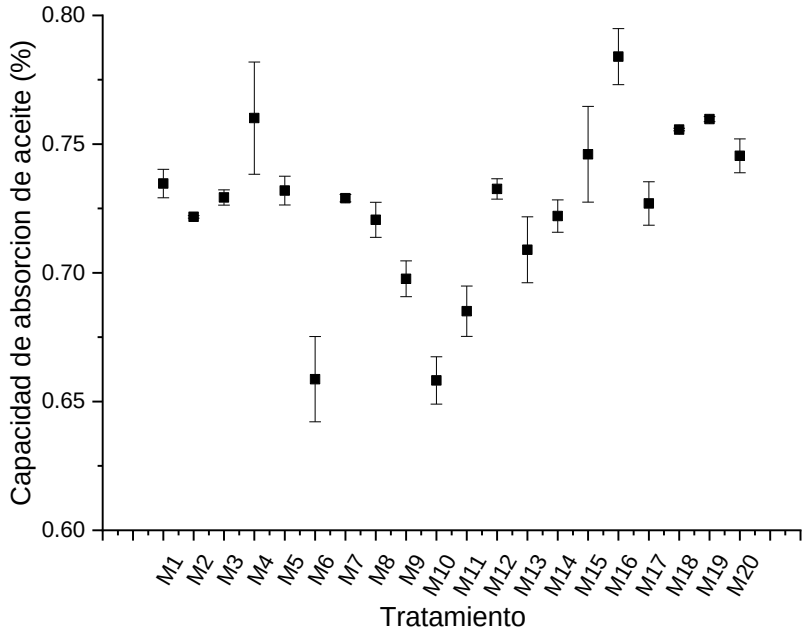


Figura 15. Resultados de la capacidad de absorción de aceite en los 20 tratamientos del MSR.

Para analizar la influencia que tienen las variables de los tiempos de cocción, reposo y secado, se realizó un análisis de varianza, que se muestra en la Tabla 23. Se muestra que el modelo global no es significativo ($p = 0.0159$), el modelo no explica variación estadísticamente significativa del CAAc, mientras que el coeficiente de determinación maneja un 82.03 %, mismo porcentaje que explica la variabilidad observada.

En los efectos lineales, aunque la variable no presentó significancia estadística ($p > 0.05$), se observó una tendencia que sugiere una posible influencia sobre la CAAc; sin embargo, esta no fue suficiente para considerarse estadísticamente significativa. La capacidad de hidratación en medio oleoso del almidón se ve afectada por los tiempos de cocción.

De manera contraria, las interacciones cuadráticas resultaron significativas ($p = 0.038$), existiendo efecto en las tres cuadráticas lo que revela la existencia de curvatura en las respuesta de CAAc. Esto puede ser interpretado a que los efectos de la cocción no son lineales y que existen niveles intermedios donde la CAAc puede maximizarse o disminuir. Por otro lado, en las interacciones entre factores, las interacciones nos resultan significantes.

Tabla 23. ANOVA de la capacitación de absorción del aceite de la MDMA, puntos centrales unificadas.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	0.063085	0.007009	2.54	0.159
Lineal	3	0.019116	0.006372	2.31	0.194
Cocción	1	0.016160	0.016160	5.85	0.060
Reposo	1	0.002479	0.002479	0.90	0.387
Secado	1	0.001560	0.001560	0.56	0.486
Cuadrado	3	0.052108	0.017369	6.28	0.038
Cocción*Cocción	1	0.035350	0.035350	12.79	0.016
Reposo*Reposo	1	0.042889	0.042889	15.52	0.011
Secado*Secado	1	0.031783	0.031783	11.50	0.019
Interacción de 2 factores	3	0.005721	0.001907	0.69	0.596
Cocción*Reposo	1	0.000238	0.000238	0.09	0.781
Cocción*Secado	1	0.000708	0.000708	0.26	0.634
Reposo*Secado	1	0.004775	0.004775	1.73	0.246
Error	5	0.013819	0.002764		
Total	14	0.076903			

En esta ocasión, el ANOVA predice la curvatura de las gráficas de superficie de respuesta a partir de las interacciones cuadráticas con significancia estadística, por lo que en la Figura 16 se muestran las interacciones entre cocción x reposo, cocción x secado y reposo x secado.

En la Figura 16, se muestran las 3 interacciones que existen entre las variables de los tiempos de cocción, reposo y secado, y todas apuntan de manera homogénea a que existe un punto máximo conforme a la capacidad de absorción de aceite, que se encuentra a los 28 minutos de tiempos de cocción, 15 horas de reposo y 10 horas de secado. Estos resultados exhiben de manera clara donde se encuentra el punto óptimo con respecto a la CAAc.

Las condiciones óptimas obtenidas en las superficies de respuesta para la CAAc favorecieron una gelatinización parcial del almidón y una desorganización moderada de la matriz granular, lo que, junto con la posible desnaturalización de proteínas, incrementó la exposición de regiones hidrofóbicas capaces de interactuar con moléculas lipídicas. Al

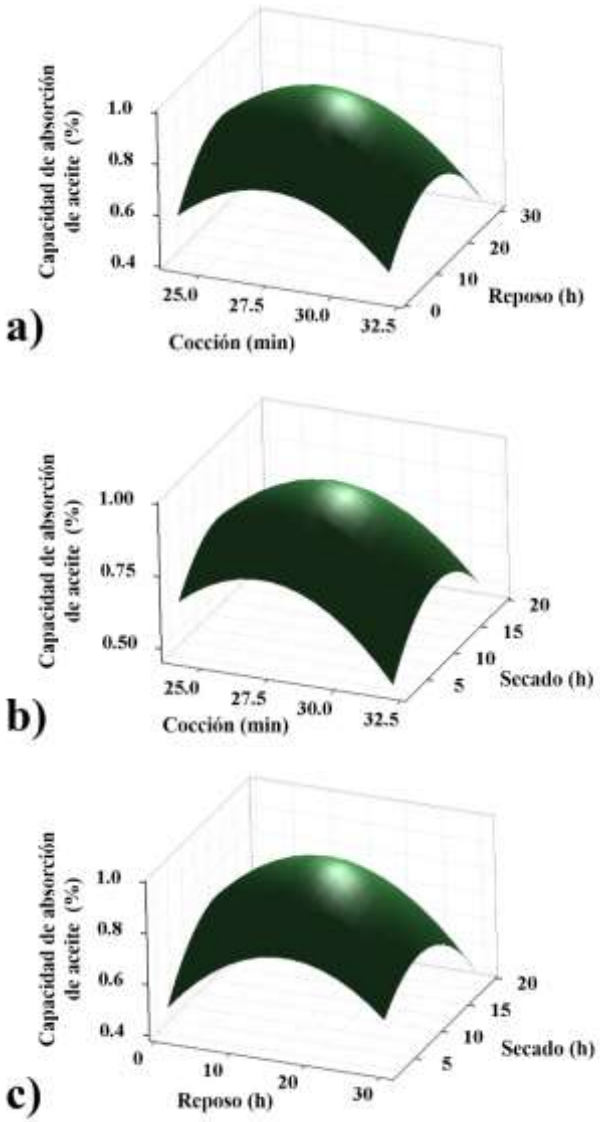


Figura 16. Gráficas de las superficies de respuesta del CAAc. a) Interacción cocción-reposo. b) Interacción cocción-secado. c) Interacción reposo-secado.

mismo tiempo, se pudo generar una estructura más porosa que facilita la retención física del aceite. La CAAc está más relacionada con modificaciones en la matriz almidón–proteína, por lo que representa una propiedad funcional influenciada por el efecto combinado de los tratamientos de cocción, reposo y secado sobre todos los componentes de la harina.

La ventaja de seleccionar estas condiciones es la obtención de harinas con mayor capacidad para retener compuestos lipídicos y aromáticos, contribuyendo a mejorar el sabor, la palatabilidad y la sensación en boca de tortillas y otros productos elaborados con maíz azul, además de favorecer la estabilidad de formulaciones que contienen grasa. 10

9.4. Discusión

Los resultados obtenidos respecto a las propiedades tecnofunciónales en el presente estudio evidenciaron que las harinas de maíz azul (MDMA) en el apartado de viscosidad se conservaron características de sistemas ricos en almidón, independientemente de las variables en tiempos de cocción, reposo y secado. Los valores de viscosidad máxima oscilaron entre 4189-5524 cP, encontrándose una fase de incremento viscoso, seguida de

breakdown y un posterior incremento durante su enfriamiento. Estas características son concluyentes con lo reportado por Rojas-Molina et al., (2020), quienes determinaron curvas de viscosidad similares en harinas comerciales y tradicionales nixtamalizadas, permitiendo confirmar que el almidón es el principal responsable del comportamiento reológico de estos sistemas.

Sin embargo, dichas harinas comerciales evaluadas por Rojas-Molina et al., (2020) alcanzaron viscosidades máximas cercanas a 5305.76 mPa·s, atribuidas a la adición de hidrocoloides en su formula. Aunque las MDMA del presente estudio no incluyeron aditivos, el tratamiento M20 se desarrollo con una viscosidad máxima de 5524 cP, superando incluso dicho valor. Sugiriendo que determinadas combinaciones de cocción, reposo y secado podrían producir modificaciones en la estructura del almidon pudiendo favorecer el desarrollo de viscosidades elevadas sin requerir agentes texturizantes. No obstante, debido a la elevada influencia estadística que presentó este tratamiento en el análisis de distancia de Cook, dicha observación debe validarse mediante experimentos adicionales antes de considerarse una condición óptima definitiva.

En el ámbito estadístico, el modelo de superficie de respuesta para la viscosidad máxima no presento significancia estadística; sin embargo, Se detectó una interacción significativa entre los tiempos de cocción y reposo de manera inicial. Pudiendo relacionarse con fenómenos de hidratación diferencial del endospermo durante el reposo, modificando la susceptibilidad del almidón a gelatinizar durante el análisis reológico. En contraste, Menchaca-Armenta et al., (2020) reportaron que la temperatura, humedad y velocidad del tornillo influyeron significativamente sobre la viscosidad de harinas extruidas de maíz azul, aunque sus viscosidades óptimas (1016.7 cP) fueron considerablemente menores que las observadas en las MDMA. Por su parte, Enríquez-Castro et al., (2020) observaron mayores viscosidades en harinas nixtamalizadas tradicionales respecto a harinas extruidas, sugiriendo que la nixtamalización convencional preserva en mayor medida la capacidad funcional del almidón.

En lo que respecta al IAA, las MDMA presentaron valores entre 2.67 y 3.13 g gel/g, encontrandose dentro de lo reportado por Contreras-Jiménez et al., (2014) para harinas de

maíz obtenidas mediante calentamiento óhmico (0.9–3.7 g gel/g). De igual manera estos resultados fueron comparables con los reportados por Jiménez-Pérez et al., (2015) en harinas nixtamalizadas producidas a partir de diferentes maíces pigmentados (2.20–2.44 g gel/g), encontrandose ligeramente superiores, pudiendo atribuir a diferencias en la estructura del almidón del maíz azul o al grado de gelatinización alcanzado durante el proceso.

Sin embargo, los valores de IAA obtenidos fueron inferiores a los descritos por Rojas-Molina et al., (2020) para harinas comerciales y tortillas recién elaboradas (3.71–5.72 g gel/g), así como a los reportados por Juárez-Barrientos et al., (2025) en mezclas extruidas de harina de maíz y semilla de yaca (5.45–7.89 g gel/g). Estas diferencias podrían considerarse por la adición de hidrocoloides o ingredientes enriquecidos con fibra, facilitando la disponibilidad de sitios de unión con el agua. En contraste, las MDMA evaluadas en este trabajo no cuentan con aditivos, por lo que su capacidad de absorción refleja principalmente el comportamiento intrínseco del almidón y los componentes propios del maíz azul.

En contraste a la viscosidad, el IAA mostró sensibilidad estadística frente a las características de procesamiento, presentando efectos significativos en la cocción y el reposo, al igual que en la interacción entre cocción y secado. Estos resultados sugieren que la hidratación del almidón depende del historial térmico acumulado durante la nixtamalización. El reposo pudiera favorecer la difusión de agua hacia el interior del grano y promover modificaciones estructurales que aumenten o limiten la disponibilidad de grupos hidroxilo capaces de interactuar con el agua. La significancia del término cuadrático de cocción evidencia, además, que la respuesta del IAA no es lineal y que existen tiempos intermedios donde la absorción de agua puede maximizarse antes de disminuir por efectos asociados a reorganización molecular o gelatinización excesiva.

En cuanto a la CAAg, los resultados mostraron valores semejantes (1.3–1.7 g/g) y sin efectos estadísticamente significativos. Este comportamiento difiere en lo reportado por Salazar et al., (2020), quienes observaron disminuciones progresivas en la absorción de agua al incorporar harinas de haba y frijol blanco en tortillas nixtamalizadas. La discrepancia pudiera radicar en que, en su estudio se modifico la composición del sistema añadiendo otras fuentes

proteicas, y en el presente estudio únicamente se alteraron variables del proceso, conservándose la composición original del maíz azul.

Del mismo modo, Enríquez-Castro et al., (2020) demostraron que la molienda seca puede inducir daño mecánico y térmico sobre los gránulos de almidón, reduciendo su capacidad funcional. Ya que la temperatura generada durante la molienda no fue controlada en este estudio, es posible que esta variable no considerada pudiera haber contribuido a la variabilidad observada y a la limitada capacidad predictiva de algunos modelos estadísticos.

En lo que respecta a la CAAc se desarrolló un comportamiento predominantemente no lineal. Aunque el modelo global resultó no significativo, las interacciones cuadráticas de cocción, reposo y secado fueron estadísticamente significativas, señalando la existencia de regiones específicas del proceso donde esta propiedad alcanza valores máximos. El comportamiento de esta tecno propiedad es similar con lo detallado por Farinde et al., (2021), quienes atribuyeron las diferencias en la CAAc a las modificaciones inducidas por el tratamiento termoalcalino sobre componentes hidrofóbicos del grano. De manera similar, Hernández-Villaseñor et al., (2025) y Esparza et al., (2024) demostraron que la relación amilosa/amilopectina y la conformación de sus cadenas influyen directamente sobre la afinidad por compuestos lipídicos.

Conjuntamente, los resultados con la literatura evidencian que las propiedades funcionales de las MDMA presentaron una elevada estabilidad frente a las variaciones moderadas de cocción, reposo y secado. Sin embargo, dicha estabilidad no infiere ausencia de respuesta tecnológica. Mientras que la viscosidad y la CAAg mostraron una marcada robustez estructural, el IAA fue especialmente sensible a determinadas etapas del proceso y la CAAc exhibió respuestas no lineales dependientes de regiones específicas del diseño experimental. Los resultados desarrollan evidencia de que la optimización de las MDMA debe orientarse hacia la identificación de combinaciones de proceso capaces de preservar simultáneamente la funcionalidad integral del sistema, más que a la maximización aislada de una sola propiedad tecno-funcional.

X. Conclusiones

El análisis integral de las propiedades evaluadas permitió señalar al tiempo de cocción como la variable independiente con mayor efecto sobre la funcionalidad de las MDMA, ya que causo influencia sobre todas las interacciones analizadas; lineales, cuadráticas e interacciones significativas dentro de los modelos ajustados. De manera en específico, la cocción influyó sobre el IAA, tanto de manera directa como mediante su interacción con el secado, evidenciando que el tratamiento térmico inicial determina en gran medida el grado de hidratación y las modificaciones estructurales del almidón. El tiempo de reposo también mostró una contribución importante, principalmente sobre el IAA, lo que sugiere que la difusión de agua y la redistribución de componentes durante esta etapa continúan modificando la funcionalidad del sistema. Por el contrario, el secado presentó una influencia más limitada y dependiente de su interacción con otras etapas del proceso.

De las propiedades estudiadas, la de mayor sensibilidad fue la IAA su modelo fue significativo y responde a efectos lineales como cuadráticos, esto señala que la capacidad de hidratación del maíz azul depende del historial térmico e hídrico acumulado durante el procesamiento. Por el contrario, la viscosidad y la CAAg obtuvieron gran estabilidad frente a las variaciones moderadas del proceso, lo que permite que a la hora de escalarlo a nivel industrial se vea como una ventaja tecnológica al favorecer una mayor reproducibilidad industrial, con una baja taza de variabilidad. Por su parte, CAAc presentó respuestas predominantemente cuadráticas, indicando la existencia de regiones específicas del proceso donde esta propiedad puede aprovecharse para obtener los máximos valores.

Considerando el comportamiento global de las propiedades evaluadas, las condiciones más recomendables para la estandarización del proceso corresponden a aquellas que permiten conservar la estabilidad funcional de las harinas sin inducir modificaciones extremas del almidón. En este sentido, el tratamiento M20 (25 minutos de cocción, 24 horas de reposo y 15 horas de secado) destacó por presentar la mayor viscosidad máxima y una influencia importante sobre los modelos estadísticos. Los análisis de distancia de Cook señalan que este tratamiento debe interpretarse con precaución debido a su elevada influencia sobre el ajuste matemático, más sin embargo, su comportamiento destacable sugiere que podría

representar una región experimental favorable para maximizar determinadas propiedades funcionales de las harinas de maíz azul. Por consiguiente, M20 no debe considerarse solo como una observación influyente, sino como una hipótesis tecnológica que merece ser validada mediante experimentos adicionales y repeticiones específicas que logren confirmar su reproducibilidad y potencial aplicación industrial.

Finalmente, los resultados obtenidos contribuyen a la estandarización de la nixtamalización del maíz azul al demostrar que este grano presenta una notable resiliencia tecnológica frente a variaciones moderadas del proceso. Más que definir un único punto óptimo, el presente estudio permitió identificar variables críticas, reconocer propiedades sensibles y establecer rangos operacionales capaces de generar masas deshidratadas con comportamiento funcional consistente.

De los hallazgos más importantes, las propiedades tecno funciónales analizadas se mantuvieron relativamente constantes. Este comportamiento infiere que el maíz azul posee una importante resiliencia tecnológica, preserva su funcionalidad aun cuando se presentan variaciones en etapas críticas de la nixtamalización. Esta característica se ofrece como una ventaja potencial para la industria, ya que indica que pequeñas desviaciones en el proceso difícilmente comprometen la calidad funcional de las harinas obtenidas.

Los resultados desarrollados resaltan atributos propios del maíz azul que lo convierten en una materia prima de interés tecnológico. Las viscosidades obtenidas por las MDMA fueron no solo equivalentes, sino que incluso se mostraron superiores a las reportadas para algunas harinas comerciales formuladas con hidrocoloides. Se podría sugerir que la composición intrínseca del maíz azul, le confiere propiedades funcionales favorables para la elaboración de productos derivados, particularmente masas y tortillas.

Por último, este estudio destaco los puntos de mejora que deberán considerarse en experimentaciones futuras, como lo son la temperatura generada durante la molienda, el tamaño de partícula, el contenido de humedad previo al secado y el grado real de gelatinización del almidón. De la misma forma, resulta encomendable ampliar los rangos experimentales evaluados, incrementar el número de repeticiones en tratamientos estratégicos y validar las condiciones con comportamiento sobresaliente mediante ensayos

confirmatorios. El control de estas variables permitirá desarrollar modelos predictivos más robustos y profundizar en la comprensión de los mecanismos responsables de las propiedades tecno-funcionales del maíz azul.

En general, el maíz azul no sólo constituye un recurso de alto valor cultural y nutrimental, sino que también se establece como una materia prima con destacada estabilidad tecnológica y potencial para el desarrollo de harinas funcionales. La identificación de condiciones de proceso capaces de preservar o potenciar sus propiedades representa una oportunidad para fortalecer el aprovechamiento y la valorización de este maíz nativo dentro de la innovación de productos derivados de la nixtamalización.

XI. Referencias

Anayansi, E.-A., Ramírez-Wong, B., Torres-Chávez, P. I., Barrón-Hoyos, J. M., Figueroa-Cárdenas, J. de D., & López-Cervantes, J. (2013). La nixtamalización y su efecto en el contenido de antocianinas de maíces pigmentados, una revisión. *Revista fitotecnia mexicana*, *36*(4), 429–437.

Arámbula Villa, G., Barrón Ávila, L., González Hernández, J., Moreno Martínez, E., & Luna Bárcenas, G. (2001a). Efecto del tiempo de cocimiento y reposo del grano de maíz (Zea mayz l.) nixtamalizado, sobre las características fisicoquímicas, reológicas, estructurales y texturales del grano, masa y tortillas de maíz. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, *51*(2), 187–194.

Arámbula Villa, G., Barrón Ávila, L., González Hernández, J., Moreno Martínez, E., & Luna Bárcenas, G. (2001b). Efecto del tiempo de cocimiento y reposo del grano de maíz (Zea mayz l.) nixtamalizado, sobre las características fisicoquímicas, reológicas, estructurales y texturales del grano, masa y tortillas de maíz. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, *51*(2), 187–194.

Arellano Vázquez, J. L., Herrera Zamora, A., Gutiérrez Hernández, G. F., Ceja Torres, L. F., Flores Gómez, E., Arellano Vázquez, J. L., Herrera Zamora, A., Gutiérrez Hernández, G. F., Ceja Torres, L. F., & Flores Gómez, E. (2021). Color, contenido de antocianinas y dimensiones de semilla en líneas endogámicas de maíz azul y sus cruzas. *Idesia (Arica)*, *39*(3), 75–82. https://doi.org/10.4067/S0718-34292021000300075

Astorga-Gaxiola, A. H., Reyes-Moreno, C., Jiménez-Edeza, M., Cuevas-Rodríguez, E. O., Mora-Rochín, S., Astorga-Gaxiola, A. H., Reyes-Moreno, C., Jiménez-Edeza, M., Cuevas-Rodríguez, E. O., & Mora-Rochín, S. (2025). Effect of Traditional Nixtamalization and Extrusion Processes on Bioaccessibility and Antioxidant Activity of Phenolic Compounds in Blue Maize Tortillas During In Vitro Fermentation by Human Colonic Microbiota. *Biotecnia*, *27*. https://doi.org/10.18633/biotecnia.v27.2520

Bressani, R., Turcios, J. C., Reyes, L., & Mérida, R. (2001). Caracterización física y química de harinas industriales nixtamalizadas de maíz de consumo humano en América Central. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, *51*(3), 309–313.

Cantillo Orozco, A. S., & Bernal Payares, O. (2020). *Innovación Empresarial en Mercadoctenia*. Red Iberoamericana de Academias de Investigación, A.C. (607-8617). https://www.researchgate.net/publication/353646865_Innovacion_Empresarial_en_Mercadoctenia

Castillo, V. K. C., Ochoa, M. L. A., Figueroa, C. J. D., Delgado, L. E., Gallegos, I. J. A., & Morales, C. J. (2009). Efecto de la concentración de hidróxido de calcio y tiempo de cocción del grano de maíz (Zea mays L.) nixtamalizado, sobre las características fisicoquímicas y reológicas del nixtamal. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, *59*(4), 425–432.

Castro-Campos, F. G., Cabrera-Ramírez, A. H., Morales-Sánchez, E., Rodríguez-García, M. E., Villamiel, M., Ramos-López, M., & Gaytán-Martínez, M. (2021). Impact of the popping process on the structural and thermal properties of sorghum grains (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Food Chemistry*, *348*, 129092. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129092

Chandra, S. (2013). *Assessment of functional properties of different flours*.

Colombo, R., Ferron, L., & Papetti, A. (2021). Colored Corn: An Up-Date on Metabolites Extraction, Health Implication, and Potential Use. *Molecules*, *26*(1), 199. https://doi.org/10.3390/molecules26010199

Contreras-Jiménez, B., Morales-Sánchez, E., Reyes-Vega, M. L., & Gaytán-Martínez, M. (2014). Propiedades funcionales de harinas de maíz nixtamalizado obtenidas por

extrusión a baja temperatura. *CyTA - Journal of Food*, *12*(3), 263–270. https://doi.org/10.1080/19476337.2013.840804

Del Pozo-Insfran, D., Brenes, C. H., Serna Saldivar, S. O., & Talcott, S. T. (2006). Polyphenolic and antioxidant content of white and blue corn (*Zea mays* L.) products. *Food Research International*, *39*(6), 696–703. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2006.01.014

Dossou, I. (2014). Physicochemical and Funtional properties of full fat and defatted ackee aril flour.pdf. *2014*. https://doi.org/10.12691/AJFST-2-6-3

Enríquez-Castro, C. M., Torres-Chávez, P. I., Ramírez-Wong, B., Quintero-Ramos, A., Ledesma-Osuna, A. I., López-Cervantes, J., & Gerardo-Rodríguez, J. E. (2020). Physicochemical, Rheological, and Morphological Characteristics of Products from Traditional and Extrusion Nixtamalization Processes and Their Relation to Starch. *International Journal of Food Science*, *2020*(1), 5927670. https://doi.org/10.1155/2020/5927670

Esparza, L. M. A., Gómez-Rodríguez, V. M., Vega, H. R., Estrada, S. H., Hernández-Villaseñor, L. A., & Mora, B. Z. V. de la. (2024). Propiedades nutricionales, fisicoquímicas, funcionales, compuestos fenólicos y actividad antioxidante de harinas de tres accesiones de maíz azul nativo de México. *INGENIERÍA: Ciencia, Tecnología e Innovación*, *11*(1), Article 1. https://doi.org/10.26495/z1k1kc46

Farinde, E. O., Dauda, T. O., & Obatolu, V. A. (2021). Heteroscedasticity analysis of nixtamalization effect on nutrients, digestibility, and functional properties of quality protein maize and indigenous local maize flour. *Journal of Food Processing and Preservation*, *45*(4), e15303. https://doi.org/10.1111/jfpp.15303

García-Campos, A. U., Cruz-Monterrosa, R. G., Rayas-Amor, A. A., Jiménez-Guzmán, J., Fabela-Morón, M. F., Salgado-Cruz, M. de la P., Cortés-Sánchez, A. de J., Villanueva-Carvajal, A., & Díaz-Ramírez, M. (2020). Caracterización físico-química de maíz (Zea mays L.) criollo (azul y rojo) del Estado de México. *Agro Productividad*, *13*(7). https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1728

Gaxiola, A. H. A., Moreno, C. R., Edeza, M. J., Rodriguez, E. O. C., & Rochin, S. M. (2025). Effect of Traditional Nixtamalization and Extrusion Processes on Bioaccessibility and Antioxidant Activity of Phenolic Compounds in Blue Maize Tortillas During In

Vitro Fermentation by Human Colonic Microbiota. *Biotecnia*, *27*, e2520–e2520. https://doi.org/10.18633/biotecnia.v27.2520

Gaytán Martínez, M., Figueroa Cárdenas, J. de D., Vázquez Landaverde, P., Morales Sánchez, E., Martínez Flores, H. E., & Reyes Vega, M. de la L. (2012). Caracterización fisicoquímica, funcional y química de harinas nixtamalizadas de maíz obtenidas por calentamiento óhmico y proceso tradicional. *CyTA: Journal of food*, *10*(3), 182–195.

Gruintal-Santos, M. Á., Zagaceta-Álvarez, M. T., Aguilar Cruz, K. A., Reséndiz-Muñoz, J., Martinez-Flores, H. E., & Fernández-Muñoz, J. L. (2021). Mathematical Model for Describing Corn Grain Dehydration Kinetics after a Nixtamalization Process. *Foods*, *10*(8), Article 8. https://doi.org/10.3390/foods10081771

Hassan, S. M., Forsido, D. S. F., Tola, D. Y. B., & Mosisa, D. A. (2023a). Optimization of the Effects of Nixtamalization on the Nutritional and Anti-Nutritional Contents of Quality Protein Maize Flour. *Journal of Agriculture, Food and Natural Resources*, *1*(1), 29–39. https://doi.org/10.20372/afnr.v1i1.603

Hassan, S. M., Forsido, D. S. F., Tola, D. Y. B., & Mosisa, D. A. (2023b). Optimization of the Effects of Nixtamalization on the Nutritional and Anti-Nutritional Contents of Quality Protein Maize Flour. *Journal of Agriculture, Food and Natural Resources*, *1*(1), 29–39. https://doi.org/10.20372/afnr.v1i1.603

Hernández-Villaseñor, L. A., Hernández-Estrada, S., Gómez-Rodríguez, V. M., Ramírez-Vega, H., Villagrán, Z., Ortega-Martínez, A., Montalvo-González, E., Ruvalcaba-Gómez, J. M., González-Silva, N., & Anaya-Esparza, L. M. (2025). Comparison of the Nutritional, Physicochemical, Technological–Functional, and Structural Properties and Antioxidant Compounds of Corn Kernel Flours from Native Mexican Maize Cultivated in Jalisco Highlands. *Crops*, *5*(3), 26. https://doi.org/10.3390/crops5030026

Humberto, G. P., & Román, de la V. S. (2012). *Análisis y diseños de experimentos 3ra edición*. https://www.academia.edu/32094439/An%C3%A1lisis_y_dise%C3%B1os_de_experimentos_3ra_edici%C3%B3n_Gutierrez_Pulido_pdf

Jiménez-Pérez, C., Ramírez-Romero, G., & Morán-Bañuelos, S. H. (2015). Instant Flour From Red and Blue Nixtamalized Maize: Production and Textural Properties of Tortilla. *Journal of Food Processing and Preservation*, *39*(1), 38–46. https://doi.org/10.1111/jfpp.12206

Juárez-Barrientos, J. M., Hernández-Santos, B., Torruco-Uco, J. G., Martínez-Sánchez, C. E., Herman-Lara, E., Ramírez-Rivera, E. J., Ramírez-Figueroa, E., Avendaño-Apolinar, A. V., Cabal-Prieto, A., & Rodríguez-Miranda, J. (2025). Optimization of Extrusion Cooking for Enhanced Physicochemical Properties in Jackfruit Seed (Artocarpus altilis) and Nixtamalized Maize (Zea mays L.) Flour Blend. *Processes*, *13*(3), 772. https://doi.org/10.3390/pr13030772

Lopez-Martinez, L. X., Oliart-Ros, R. M., Valerio-Alfaro, G., Lee, C.-H., Parkin, K. L., & Garcia, H. S. (2009). Antioxidant activity, phenolic compounds and anthocyanins content of eighteen strains of Mexican maize. *LWT - Food Science and Technology*, *42*(6), 1187–1192. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.10.010

Menchaca-Armenta, M., Ramírez-Wong, B., Torres-Chávez, P. I., Quintero-Ramos, A., Ledesma-Osuna, A. I., Frutos, M. J., Gutiérrez-Dorado, R., Campas-Baypoli, O. N., & Morales-Rosas, I. (2020). Effect of extrusion conditions on the anthocyanin content, functionality, and pasting properties of obtained nixtamalized blue corn flour (Zea mays L.) and process optimization. *Journal of Food Science*, *85*(7), 2143–2152. https://doi.org/10.1111/1750-3841.15312

MILÁN-CARRILLO, J., GUTIÉRREZ-DORADO, R., CUEVAS-RODRÍGUEZ, E. O., GARZÓN-TIZNADO, J. A., & REYES-MORENO, C. (2004). Nixtamalized Flour From Quality Protein Maize (Zea mays L). Optimization of Alkaline Processing. *Plant Foods for Human Nutrition*, *59*(1), 35–44. https://doi.org/10.1007/s11130-004-4306-6

Mora-Rochín, S., Gaxiola-Cuevas, N., Gutiérrez-Uribe, J. A., Milán-Carrillo, J., Milán-Noris, E. M., Reyes-Moreno, C., Serna-Saldivar, S. O., & Cuevas-Rodríguez, E. O. (2016). Effect of traditional nixtamalization on anthocyanin content and profile in Mexican blue maize (*Zea mays* L.) landraces. *LWT - Food Science and Technology*, *68*, 563–569. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.01.009

NOM-247-SSA1-2008. (2008). https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5100356

Pecuarias, I. N. de I. F., Agrícolas y. (2020). *Maíz azul: Coloreando nuestras tradiciones*. gob.mx. http://www.gob.mx/inifap/es/articulos/maiz-azul-coloreando-nuestras-tradiciones?idiom=es

Pulido, H. G. (2013). *Control estadístico de la calidad y Seis Sigma*.

Quality Parameters of Masa and Tortillas Produced from Blue Maize (Zea mays sp. Mays) Landraces—Chimimba—2019—Journal of Food Science—Wiley Online Library. (s/f). Recuperado el 9 de marzo de 2026, de https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1750-3841.14442?casa_token=-VOBEh8DMHoAAAAA%3ASfsfH9QOetcPbEKb8PJLopTZIxs6FESdDJeZn6LfOXgpFYgkim61jEHT5MERQf43W77bZLAZwO_6OduLOA

Rodríguez-Salinas, P. A., Zavala-García, F., Urías-Orona, V., Muy-Rangel, D., Heredia, J. B., & Niño-Medina, G. (2020). Chromatic, Nutritional and Nutraceutical Properties of Pigmented Native Maize (Zea mays L.) Genotypes from the Northeast of Mexico. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *45*(1), 95–112. https://doi.org/10.1007/s13369-019-04086-0

Rojas-Molina, I., Mendoza-Avila, M., Cornejo-Villegas, M. de los Á., Real-López, A. D., Rivera-Muñoz, E., Rodríguez-García, M., & Gutiérrez-Cortez, E. (2020). Physicochemical Properties and Resistant Starch Content of Corn Tortilla Flours Refrigerated at Different Storage Times. *Foods*, *9*(4), 469. https://doi.org/10.3390/foods9040469

Salazar, D., Rodas, M., & Arancibia, M. (2020). *Production of tortillas from nixtamalized corn flour enriched with Andean crops flours: Faba-bean (Vicia faba) and white-bean (Phaseolus vulgaris)*. https://doi.org/10.9755/ejfa.2020.v32.i10.2179

Salinas-Moreno, Y., & Aguilar-Modesto, L. (2010). EFFECT OF MAIZE (Zea mays L.) GRAIN HARDNESS ON YIELD AND QUALITY OF TORTILLA. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, *2*(1), 5–11. https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2010.08.009

Santiago-Ramos, D., Figueroa-Cárdenas, J. de D., & Véles-Medina, J. J. (2018). Viscoelastic behaviour of masa from corn flours obtained by nixtamalization with different

calcium sources. *Food Chemistry*, *248*, 21–28. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.12.041

Schaarschmidt, S., & Fauhl-Hassek, C. (2019). Mycotoxins during the Processes of Nixtamalization and Tortilla Production. *Toxins*, *11*(4), Article 4. https://doi.org/10.3390/toxins11040227

Sefa-Dedeh, S., Cornelius, B., Sakyi-Dawson, E., & Afoakwa, E. O. (2004). Effect of nixtamalization on the chemical and functional properties of maize. *Food Chemistry*, *86*(3), 317–324. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.08.033

Serna-Saldivar, S. O. (2016). *Cereal Grains: Properties, Processing, and Nutritional Attributes*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781439882092

Stoyanova, A., Marinova, V., Stoilov, D., & Kirechev, D. (2022). Food Safety Management System (FSMS) Model with Application of the PDCA Cycle and Risk Assessment as Requirements of the ISO 22000:2018 Standard. *Standards*, *2*(3), Article 3. https://doi.org/10.3390/standards2030023

Timm, N. da S., Ramos, A. H., Ferreira, C. D., Biduski, B., Eicholz, E. D., & Oliveira, M. de. (2020). Effects of drying temperature and genotype on morphology and technological, thermal, and pasting properties of corn starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, *165*, 354–364. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.197

Uriarte-Aceves, P. M., Cuevas-Rodríguez, E. O., Gutiérrez-Dorado, R., Mora-Rochín, S., Reyes-Moreno, C., Puangpraphant, S., & Milán-Carrillo, J. (2015). Physical, Compositional, and Wet-Milling Characteristics of Mexican Blue Maize (Zea mays L.) Landrace. *Cereal Chemistry*, *92*(5), 491–496. https://doi.org/10.1094/CCHEM-01-15-0001-R

Valderrama Bravo, M. del C., Sánchez Lara, M. J., Contreras Padilla, M., Pahua Ramos, M. E., & Jiménez Ambriz, S. (2021). Effect of wet grinding and drying of the nixtamal on physicochemical, morphologic, and vibrational properties of flours and rheological changes of masa. *Journal of Food Processing and Preservation*, *45*(5), e15415. https://doi.org/10.1111/jfpp.15415

Vargas, L. A. (2014). El maíz, viajero sin equipaje1. *Anales de Antropología*, *48*(1), 123–137. https://doi.org/10.1016/S0185-1225(14)70492-8

Vázquez Peña, C., & Labarca, N. (2013). Calidad y estandarización como estrategias competitivas en el sector agroalimentario. *Revista Venezolana de Gerencia*, *17*(60). https://doi.org/10.31876/revista.v17i60.10939

Villegas, E. (s/f). Calidad nutricional e industrial de Maíz. *2018*.

Xochipa-Morante, R. C., Escobedo-Garrido, J. S., Macías-López, A., Guerrero-Rodríguez, J. D. D., Valadez-Ramírez, M., Mora-Flores, J. S., Xochipa-Morante, R. C., Escobedo-Garrido, J. S., Macías-López, A., Guerrero-Rodríguez, J. D. D., Valadez-Ramírez, M., & Mora-Flores, J. S. (2021). Consumidores de productos de maíz azul en mercados de productores, Sierra Nevada, Puebla, México. *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, *31*(58). https://doi.org/10.24836/es.v31i58.1176