



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DEL RIZOMA DE LA PAPATA (*Canna indica* l.)”

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

P R E S E N T A

**ING. MARÍA GUADALUPE DORANTES
FUERTES**

ASESOR

DRA. MARÍA CRISTINA LÓPEZ MÉNDEZ

CODIRECTOR

DR. ROBERTO ÁNGEL MELÉNDEZ ARMENTA

MISANTLA, VERACRUZ

AGOSTO, 2024



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN MAESTRÍA

FECHA:
13 DE AGOSTO DE 2024

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN:
TESIS PROFESIONAL

A QUIEN CORRESPONDA:

Por medio de la presente se hace constar que el (la) C:

MARIA GUADALUPE DORANTES FUERTES

Estudiante de la **MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL** con No. de Control **222T0496** ha cumplido satisfactoriamente con lo estipulado por el Lineamiento de Posgrado para la obtención del grado de Maestría mediante TESIS PROFESIONAL

Por tal motivo se **Autoriza** la impresión del Tema titulado:

"OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DEL ALMIDÓN DEL RIZOMA DE LA PAPATA (Canna indica l)"

Dándose un plazo no mayor de un mes de la expedición de la presente a la solicitud del examen para la obtención del grado de maestría.

ATENTAMENTE

DRA. MARÍA CRISTINA LÓPEZ MÉNDEZ
Presidente



DR. ROBERTO ÁNGEL MELENDEZ ARMENTA
Secretario

DR. GUSTAVO MARTÍNEZ CASTELLANOS
Vocal

Archivo.

Dedicatoria

A mi madre, el pilar fundamental en mi vida,
gracias por tu amor y ayuda incondicional siempre.

A mi pareja, por ser mi apoyo constante en
todo momento. A mi pequeño hijo, por darme
la dicha de ser madre y enseñarme el verdadero
significado del amor.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la salud, fortaleza y perseverancia necesaria para no desistir y poder concluir esta etapa en mi vida.

A mi familia, por su amor, apoyo incondicional y constante motivación en cada paso de este camino. A mi madre por estar siempre para mí y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. Sin ustedes, no habría sido posible alcanzar esta meta.

A mi directora de tesis, Dra. María Cristina López Méndez por ser mi guía en todo este tiempo y por su invaluable apoyo, su disposición para resolver mis dudas así como sus consejos y conocimientos los cuales fueron importantes en el desarrollo de este trabajo. Agradezco de todo corazón su compromiso y dedicación, los cuales me inspiraron a dar siempre lo mejor de mí en este camino.

Al Dr. Roberto Ángel Meléndez Armenta por brindarme su apoyo, agradezco el tiempo que dedicó para revisar mi trabajo, ofrecer críticas constructivas y compartir su experiencia.

Al Dr. Gustavo Martínez Castellanos por la especial atención que me brindó durante mi estancia en la maestría. Sus consejos y aportaciones fueron fundamentales en este trabajo.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, por el sustento económico que me proporcionó, el cual me permitió alcanzar y concluir esta meta en mi vida profesional.

Resumen

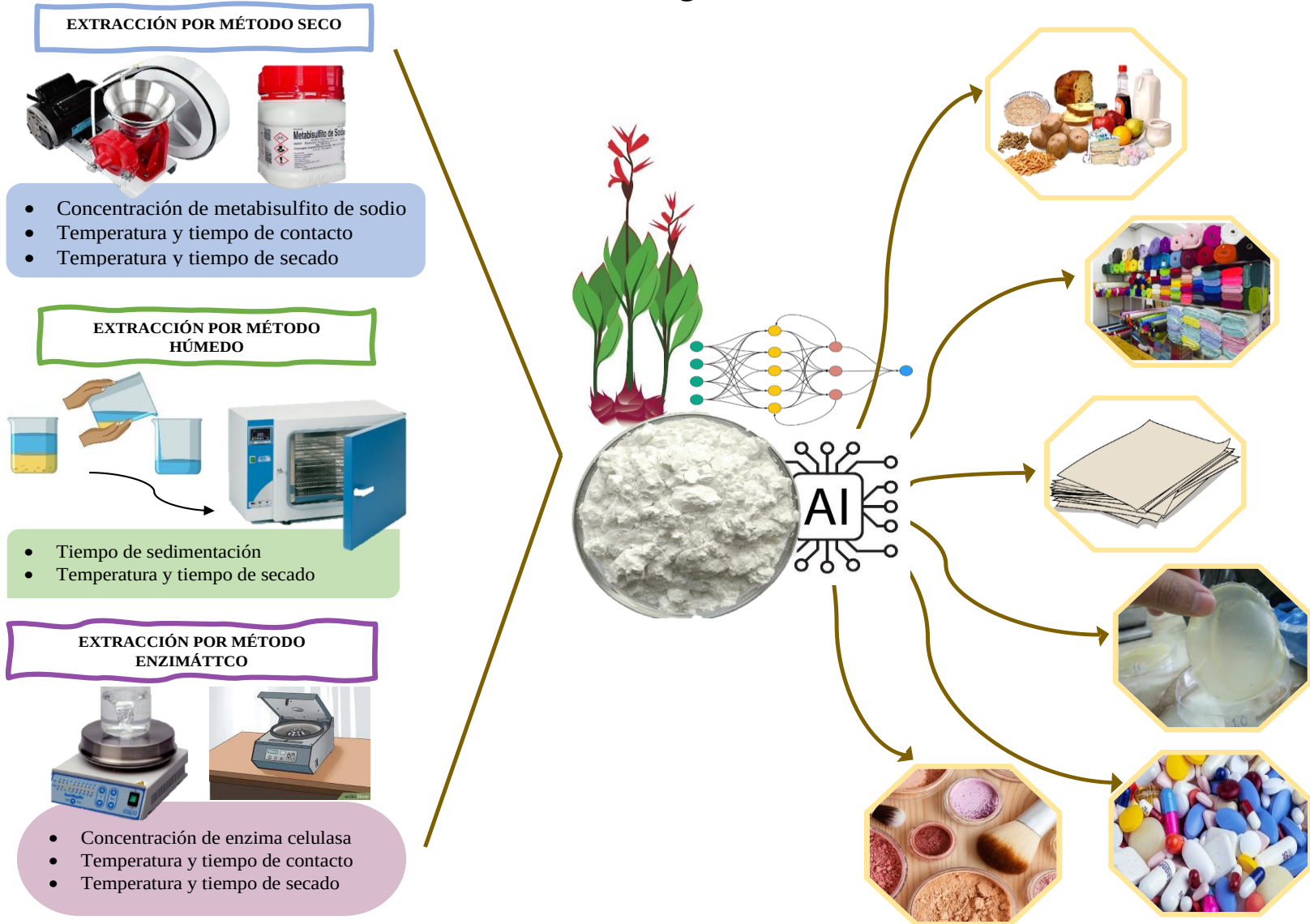
La presente investigación establece la implementación de un proceso de extracción de almidón a partir del rizoma de *Canna indica l.* conocida como papata silvestre en la región de Misantla, la cual no tiene ningún uso en dicho municipio ya que, al ser una planta perecedera, se considera como maleza, por lo que es desechada por los agricultores pues afecta el terreno destinado a sus cosechas.

Se evaluaron tres métodos diferentes: húmedo, seco y enzimático. En cada método se manejaron variables específicas tales como el tiempo de sedimentación, la concentración de metabisulfito, la concentración de enzimas, el tiempo de contacto, la temperatura de secado y el tiempo de secado, entre otros. Se realizó un análisis estadístico para evaluar el impacto de estas variables en el rendimiento del almidón.

Además del análisis estadístico, se implementaron técnicas de inteligencia artificial para mejorar la precisión de la predicción del rendimiento de almidón basándose en los datos experimentales. Para el método seco, se desarrolló un modelo de red neuronal, para el método húmedo se utilizaron bosques aleatorios. Estos modelos fueron entrenados y validados utilizando los datos obtenidos de las pruebas experimentales, demostrando su efectividad en la predicción del rendimiento de almidón bajo diversas condiciones.

Los resultados indican que la elección del método de extracción y la predicción de las variables del proceso influyen significativamente en el rendimiento del almidón de los rizomas de *Canna indica l.* Esta investigación, además, aporta conocimientos sobre la extracción eficiente de almidón de *Canna indica l.* y destaca el potencial de integrar inteligencia artificial en la optimización de procesos.

Resumen gráfico



Índice de contenido

Introducción.....	VIII
Capítulo 1. Generalidades	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.3 Objetivos	4
1.4 Hipótesis	4
1.5 Propuesta de solución	5
1.6 Metodología.	6
1.7 Alcance de la investigación.	8
1.8 Limitación de la investigación.	8
1.9 Impacto social, económico y/o ambiental.....	9
Capítulo 2. Marco teórico y estado del arte.....	1
2.1 Marco teórico.....	1
2.1.1 <i>Canna indica</i> L.	1
2.1.2 Denominaciones regionales	1
2.1.3 Origen y distribución geográfica	1
2.1.4 Estructura.....	2
2.1.5 Raíz.....	4
2.1.6 Tallo.....	4
2.1.7 Hojas.....	4
2.1.8 Flor	5
2.1.9 Fruto	5
2.1.10 Hábitat	5
2.1.11 Importancia socioeconómica	6
2.1.12 Usos	6
2.1.13 Rizoma.....	7
2.1.14 Anatomía	8
2.1.15 Composición química.....	9
2.1.16 Funciones.....	9
2.1.17 Almidón.....	10

2.1.18 Tipos de almidón	13
2.2 Estado del arte.....	13
2.2.1 Métodos de extracción de almidón.....	19
2.2.2 Vía húmeda.....	19
2.2.3 Vía seca.....	22
2.2.4 Método por trituración y prensado	23
2.2.5 Centrifugación	24
2.2.6 Método por solventes.....	26
2.2.7 Método enzimático	27
2.2.8 Método asistido por ultrasonido	29
2.2. 9 Inteligencia artificial.....	30
Capítulo 3. Metodología.....	34
3.1 Revisión de la literatura	35
3.2 Establecer los métodos de extracción	36
3.3 Definición de las variables.....	38
3.4 Diseño de experimentos.....	40
3.5 Obtención de datos.....	43
3.6 Análisis e interpretación de los datos	56
3.7 Implementación de inteligencia artificial.....	56
Capítulo 4. Resultados.....	57
4.1 Extracción de almidón en rizoma de <i>Canna indica</i> L. por método seco	57
4.2 Extracción de almidón en rizoma de <i>Canna indica</i> L. por método húmedo.....	60
4.3 Extracción de almidón en rizoma de <i>Canna indica</i> L. por método enzimático	62
4.4 Análisis estadístico para la extracción por método seco.....	64
4.5 Análisis estadístico para la extracción por método húmedo	66
4.6 Análisis estadístico para la extracción por método enzimático	68
4.7 Comparación entre métodos	70
4.8 Implementación de técnicas de inteligencia artificial	74
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones	78
5.1 Conclusiones	78
5.2 Recomendaciones	79

Referencias	81
Anexos	87

Índice de figuras

Figura 1 <i>Canna indica</i> l.....	1
Figura 2. Distribución geográfica de <i>Canna indica</i> l. en el estado de Veracruz.....	1
Figura 3. Estructura de <i>Canna indica</i> l.....	3
Figura 4. Rizoma de <i>Canna indica</i> l.....	8
Figura 5. Estructura química de la amilosa.	11
Figura 6. Estructura química de la amilopectina..	12
Figura 7. Metodología propuesta para la implementación del proceso de extracción de almidón de rizoma de <i>Canna indica</i> l.....	34
Figura 8. Metodología propuesta para el método por vía seca.....	36
Figura 9. Metodología propuesta para el método por vía húmeda.	37
Figura 10. Metodología propuesta para el método por vía enzimática.	38
Figura 11. Ubicación de la finca.....	43
Figura 14. Preparación del primer tratamiento	45
Figura 15. Reducción de tamaño en rodajas.....	45
Figura 16. Segundo tratamiento de rizoma de <i>Canna indica</i> l.	46
Figura 17. Rodajas de rizoma de <i>Canna indica</i> l. en la estufa de secado.	46
Figura 18. Rodajas de rizoma de <i>Canna indica</i> l. en proceso de secado	47
Figura 19. Rizoma de <i>Canna indica</i> l. después del proceso de secado.	47
Figura 20. Molienda del rizoma de <i>Canna indica</i> l seco.....	48
Figura 21. Tamizado del rizoma de <i>Canna indica</i> l molido.....	48
Figura 22. Rizoma de <i>Canna indica</i> l cortado en trozos.	49
Figura 23. Molienda del rizoma de <i>Canna indica</i> l.....	49
Figura 24. Proceso de sedimentación de almidón del rizoma de <i>Canna indica</i> l.....	50
Figura 25. Proceso de lavado de almidón del rizoma de <i>Canna indica</i> l.	50
Figura 26. Almidón de rizoma de <i>Canna indica</i> l. sedimentado.....	51
Figura 27. Proceso de tamizado	51
Figura 28. Almidón del rizoma de <i>Canna indica</i> l. sedimentado.....	52
Figura 29. Reducción de tamaño del rizoma de <i>Canna indica</i> l.	52
Figura 30. Rizoma de <i>Canna indica</i> l molido.	53

Figura 31. Preparación de la enzima celulasa .	53
Figura 32. Incubación de la enzima con el rizoma	54
Figura 33. Rizoma filtrado a través de una malla	54
Figura 34. Centrifugación del almidón de rizoma de <i>Canna indica l.</i>	55
Figura 35. Almidón sedimentado después del lavado.	55
Figura 36. Almidón del rizoma de <i>Canna indica l</i> obtenido por método seco.	57
Figura 37. Almidón del rizoma de <i>Canna indica l</i> obtenido por método húmedo	60
Figura 38. Almidón del rizoma de <i>Canna indica l</i> obtenido por método enzimático.	62
Figura 39. Grafica del rendimiento obtenido en los tratamientos por método seco.	64
Figura 40. Grafica del rendimiento obtenido en los tratamientos por método húmedo.	66
Figura 41. Grafica del rendimiento obtenido en los tratamientos por método enzimático.	68
Figura 42. Comparación entre métodos de extracción de almidón.	73
Figura 43. Interfaz gráfica para el como numerar una pagina diferente con arabigo cuando la anterior es en romanode extracción seco antes de colocar datos.	75
Figura 44. Interfaz gráfica para el método de extracción seco con datos.	75
Figura 45. Interfaz gráfica para el méetodo de extracción húmedo con datos.	76
Figura 46. Interfaz gráfica para el método de extracción húmedo con datos ejemplo.	77

Índice de tablas

Tabla 1. Características fisicoquímicas del almidón de rizoma de <i>Canna indica l.</i>	14
Tabla 2. Características químicas del almidón de <i>Canna indica l</i> con otros tuberculos y raíces	16
Tabla 3. Características composicionales del almidón de <i>Canna indica l</i> con otros tuberculos y raíces como numerar una pagina diferente con arabigo cuando la anterior es en romano	18
Tabla 4. Valores de referencia a considerar en cada variable del método seco	39
Tabla 5. Valores de referencia a considerar en cada variable del método húmedo	39
Tabla 6. Valores de referencia a considerar en cada variable del método enzimático.	39
Tabla 7. Pruebas para el método de extracción en <i>Canna indica l.</i> por vía seca	40
Tabla 8. Pruebas para el método de extracción en <i>Canna indica l.</i> por vía húmeda.	41
Tabla 9. Pruebas para el método de extracción en <i>Canna indica l.</i> por vía enzimática.	42

Tabla 10. Resultados obtenidos en la extracción de almidon mediante método seco.	58
Tabla 11. Resultados obtenidos en la extracción de almidon mediante método húmedo.	60
Tabla 12. Resultados obtenidos en la extracción de almidon mediante método enzimático....	62
Tabla 13. Estadísticos descriptivos de los resultados por método seco.....	65
Tabla 14. Estadísticos descriptivos de los resultados por método húmedo.....	67
Tabla 15. Estadísticos descriptivos de los resultados obtenidos por método enzimático.....	69
Tabla 16. ANOVA de una vía para la comparación de rendimientos	70
Tabla 17. Prueba de Turkey para la comparación de rendimientos	72
Tabla 18. Características de la red neuronal.....	74

Anexos

Anexo 1. Reconocimiento de participación en el INNOVA TecNM 2023.....	87
Anexo 2. Constancia de participación en el Congreso Iberoamericano de Ciencia, Educación y Tecnología	88
Anexo 3. Artículo de revisión "Métodos de extracción de almidón en tubérculos y raíces"	89

Introducción

La Papata silvestre, llamada científicamente *Canna indica* L., es uno de los cultivos de tubérculos nativos de México, que pertenece a la familia *Cannaceae*.

Canna indica L. es nativa de México, sin embargo, en las regiones en las que se cultiva es conocida de diferente manera. De manera general Rzedowski (1998) señala que los nombres más comunes en que se le nombra a esta planta son: *hoja de cuenta*, *papatla*, *papatla del monte*, *papatla silvestre*, *chancle*, *chilalaga* y *bandera*. Por otra parte, Martínez (1979) cita otros nombres que se le atribuyen como *caña de coro*, *caña de cuentas*, *coyol*, *changara*, *flor de cangrejo*, *hierba del rosario*. *Chachalaca*, *chimalaga*, *papata* y *platanillo*, siendo estos dos últimos los que más se usan en Veracruz (Jiménez, 1980). Específicamente, en la región de Misantla, es conocida como “*papata ratón o silvestre*”.

En el 2012, Andrade-Mahecha M. et al. describieron que esta que esta planta tiene un gran potencial de aplicación en alimentos debido a que sus raíces (rizomas) son una materia prima interesante para la extracción de almidón y el desarrollo de películas comestibles. Además, esta planta, forma parte de las 25 fuentes de consumo de almidón, el cual es uno de los polímeros de carbohidratos naturales más abundantes y no es alergénico, reconocido como seguro y de bajo costo.

Los rizomas, se encuentran en la parte inferior de la planta, entre sus principales características, se encuentran que es carnoso y ramificado, cuenta con una superficie labrada por zanjales transversales, que le dan forma a la base de escamas, las cuales la recubren; además, de la parte inferior salen raíces pequeñas de color blanco, donde hay numerosas yemas, brotan las hojas, el vástago floral y los tallos.

Algunos informes han documentado que el almidón de *Canna* se caracteriza por gránulos muy grandes, pasta transparente, alta viscosidad, alta retrogradación (Andrade-Mahecha, M. et al., 2012), es por ello que la alta viscosidad y la pasta transparente del almidón de *Canna* lo hacen potencialmente interesante para su uso como agente espesante.

Por ello, se pretende implementar un proceso de obtención de almidón a partir del rizoma de la papata silvestre, estableciendo distintas variables para definir un proceso y alcanzar el mayor rendimiento de este almidón.

Por otra parte, actualmente el uso de técnicas de inteligencia artificial está revolucionando la investigación, ya que puede ser aplicada a múltiples disciplinas, en el caso de procesos de extracción de almidón, técnicas como redes neuronales y bosques aleatorios se aplican para la predicción del rendimiento ya que pueden analizar grandes conjuntos de datos experimentales para identificar patrones y relaciones complejas entre las variables del proceso, como tiempo de sedimentación, temperatura y concentración de reactivos. Integrar técnicas de inteligencia artificial en la investigación sobre la extracción de almidón de *Canna indica* L. podría acelerar significativamente el desarrollo de métodos más efectivos, beneficiando tanto a la industria alimentaria como a la investigación científica.

Capítulo 1. Generalidades

1.1 Planteamiento del problema

La “papata silvestre” (*Canna indica* L.) es una planta herbácea robusta de 0.5 a 3.5 m de altura, cuyo en su inferior se encuentra abastecida de rizomas horizontales gruesos e intrincados; hojas prolongadas en su base en una larga vaina, que envuelve al tallo (Rzedowski, 1998). La mayoría de los cultivares de esta planta se desarrollan sin esfuerzo siempre que reciban al menos 6-8 horas de luz diurna normal.

En la región de Misanla, esta planta se conoce comúnmente como “papata ratón” o “papata silvestre” que se adapta perfectamente a la tierra de la zona, ya que florece y fructifica prácticamente todo el año, no obstante, esta planta no tiene un uso entre los agricultores, pues para ellos, representa una plaga o maleza entre sus tierras, por lo que su única opción es arrancarla y desecharla. Al contrario, la *Canna tuerckheimii*, es cultivada para la producción y cosecha de sus hojas, que son utilizadas para la envoltura de alimentos.

Sin embargo, esta planta, de acuerdo a Andrade-Mahecha et al., (2012), forma parte de las 25 fuentes de consumo de almidón, el cual es uno de los polímeros de carbohidratos naturales más abundantes y no es alergénico, reconocido como seguro y de bajo costo. Pues, en otros países de Sudamérica como Argentina, Colombia y Brasil, es utilizada con fines comerciales para la producción de almidón, el cual es extraído de sus rizomas, los cuales de acuerdo a Hernández et al. (2008), son una materia prima interesante para la extracción de este.

El almidón es el polisacárido más utilizado en la industria alimentaria, ya que se utiliza comúnmente como ingrediente esencial en gran variedad de alimentos debido a su gran versatilidad y su bajo costo, se emplea principalmente como agente espesante, el cual ayuda al producto a incrementar su viscosidad, por ejemplo, salsas y potajes, también como agente estabilizante de geles o emulsificantes, como elemento ligante y agente de relleno (Ruales, 1992).

De acuerdo a lo reportado por Sarmiento et al. (2002), el rendimiento de la producción de almidón de esta *Canna indica* L. brasileña fue de 12 g de almidón/100 g de rizomas frescos, por

lo que el rendimiento de almidón por rizoma es bajo, se pretende para ello establecer un proceso de extracción de almidón de dicha planta, para que, de esta manera se puedan aprovechar estos recursos.

1.2 Justificación

La Papata silvestre, llamada científicamente *Canna indica* L. o *Canna edulis*., es uno de los cultivos de tubérculos nativos de México, que pertenece a la familia Cannaceae. Según Jiménez (1980), en el estado de Veracruz, la distribución se concentra en la zona central, abarcando los municipios de Córdoba, Orizaba, Xalapa, Veracruz.

De acuerdo a Jiménez (1980) hay diferencias entre los ejemplares citados como silvestres y los cultivados. Los cultivados presentan todas las partes florales y las hojas, de mayor tamaño que las silvestres. De acuerdo a lo anterior, en Misantla prolifera la papata ratón o silvestre (*Canna indica* L.), la cual se diferencia de la especie *Canna tuerckheimii* precisamente por el tamaño de sus hojas, las cuales se utilizan para la elaboración de alimentos o como envoltura de estos, como tamales, empapatas, entre otros. Por el contrario, la *Canna indica* L., debido a su tamaño, sus hojas no son óptimas para utilizarse, por lo que los agricultores la consideran una maleza (hierba indeseable) en sus cultivos, sin embargo, sus rizomas, en otros países como Argentina, Colombia son cosechados y utilizados para la obtención de almidón, como materia prima para la elaboración de bizcochos y de otros productos de consumo local y regional como pan, coladas y natillas. (Ortega et al., 2020)

El almidón es uno de los principales agentes utilizados en la industria alimentaria, y para obtenerlo, tradicionalmente existen distintos métodos para su obtención. Actualmente, tanto la seguridad como la soberanía alimentaria es un tema de importancia, ya que estas se basan en la necesidad de aumentar la producción y la productividad de alimentos para enfrentar la demanda futura (Gordillo & Méndez-Jerónimo, 2013). La soberanía alimentaria se centra principalmente en alimentos para los pueblos, además de que es compatible con la naturaleza, pues “rechaza el uso intensivo de energías, de monocultivo industrializado y demás métodos destructivos” (Food Secure Canada, 2012).

Esto quiere decir que los problemas en cuanto a la alimentación competen, residen en el acceso a alimentos dignos para la población, los cuales deben de cumplir con las suficientes características nutritivas y de fácil acceso para la sociedad. Por lo anterior, el producir alimentos como el almidón a partir de recursos que se encuentran dentro del alcance de la mayoría de la población de Misantla, como lo es la *Canna indica* L., contribuye a que la población “tenga acceso regular a alimentos de buena calidad que les permitan llevar una vida activa y saludable”, de acuerdo a la FAO esto consiste en “mejorar la nutrición, aumentar la productividad agrícola, elevar el nivel de vida de la población rural y contribuir al crecimiento de la economía mundial”, en este caso, la de la población misanteca.

Algunos de los métodos de obtención de almidón son: por vía húmeda que se utiliza a nivel industrial, por vía seca o bien métodos más avanzados como la extracción enzimática o asistida por ultrasonido, según los reportados por López et al. (2019).

Se propone encontrar las condiciones necesarias mediante la manipulación de variables de método, tiempo, temperatura y concentraciones a fin de crear un diseño experimental que ayude a establecer un proceso de extracción de almidón de los rizomas de esta planta y así poder aprovechar sus rizomas ya que, de acuerdo a Andrade-Mahecha et al. (2011) el almidón de *Canna indica* L. tiene la ventaja competitiva frente a otros almidones en que su gránulo es más grande de todas las especies vegetales conocidas, como el trigo, yuca, papa y maíz, por esta razón, este almidón es digerido fácilmente por el organismo.

Además, la integración de técnicas de inteligencia artificial en el proceso de extracción de almidón puede tener ventajas en cuanto a eficiencia y optimización, ya que mediante el uso de técnicas como bosques aleatorios y redes neuronales y, empleando datos previamente obtenidos, la inteligencia artificial puede identificar las condiciones óptimas para maximizar el rendimiento del almidón, reducir el tiempo mediante la predicción del rendimiento, permitiendo una toma de decisiones más informada y una mejora continua del proceso de extracción. Por lo tanto, el empleo de la inteligencia artificial no solo potencia la eficacia del proceso, sino que también promueve la innovación en la producción de almidón a partir de *Canna indica* L., contribuyendo así al desarrollo agroindustrial y a la seguridad alimentaria de la región.

1.3 Objetivos

Objetivo general

Diseñar una metodología experimental para optimizar el proceso de extracción del rizoma de *Canna indica* L. y predecir su rendimiento mediante uso de técnicas de inteligencia artificial.

Objetivos específicos

- Realizar una revisión literaria de los métodos de obtención de almidón y las variables involucradas.
- Establecer un diseño experimental seleccionando las variables involucradas en el proceso de extracción vía húmeda, vía seca y vía enzimática.
- Evaluar el proceso de extracción de almidón en las tres vías para la selección de las mejores condiciones mediante análisis estadístico.
- Implementar técnicas de inteligencia a los procesos de extracción para el predecir el rendimiento.

1.4 Hipótesis

Las técnicas de extracción de almidón de Canna indica L. mostraran rendimientos diferentes en base a tres métodos: húmedo, seco y enzimático. En base a esos rendimientos, es posible optimizar el proceso de extracción con la implementación de redes neuronales y bosques aleatorios.

1.5 Propuesta de solución

Actualmente, la producción de almidón juega un papel importante en la industria de los alimentos, ya que es el único polisacárido vegetal que puede ser digerido por el ser humano, debido a que está compuesto mayormente por glucosa, la cual es una fuente importante de energía que se asimila fácilmente al cuerpo.

Este polisacárido es encontrado en gran variedad de vegetales, tuberculos y raíces, de los cuales algunos aún no han sido hallados o estudiados, en la región de Misantla, Veracruz abunda la planta de *Canna indica* L., mejor conocida como papata ratón, la cual posee rizomas intrínsecos compuestos de almidón. Por lo cual en la búsqueda de aportar descubrimientos en cuanto a las propiedades de la *Canna indica* L., se propone estudiar los rizomas de esta planta como fuente de obtención de almidón.

Para lo cual se pretende establecer un proceso de obtención adecuado a través del estudio de tres variables, concentraciones, tiempo y temperatura.

1.6 Metodología.

La metodología propuesta para el logro de los objetivos establecidos para este proyecto se dividirá en las siguientes etapas.

Etapas 1: Revisión literaria.

En esta etapa se realiza una revisión de la literatura en torno a los procesos de obtención del almidón obtenido de diferentes vegetales, tuberculos y raíces, enfocando principalmente en el método húmedo, seco y enzimático. Posteriormente, habiendo recabado información se analizará cada uno de estas técnicas para determinar las principales variables que se manejan para la obtención de este, es decir, temperaturas, concentraciones y tiempos, mediante la recolección de artículos científicos que detallen los procedimientos y resultados de cada método, identificando, de esta manera, las condiciones experimentales más comunes y sus resultados en cuanto a rendimiento y calidad del almidón. Así mismo, se podrán determinar las combinaciones de variables a manejar.

Esta revisión y análisis de la literatura permitirá establecer una base sólida para el desarrollo de un proceso de extracción de almidón a partir de los rizomas de *Canna indica* L. Al comprender las variables críticas y las condiciones óptimas, se podrá conocer el rendimiento del almidón de esta planta, contribuyendo significativamente al conocimiento científico.

Etapas 2. Establecer un diseño experimental.

Basado en los hallazgos de la revisión literaria, se propondrá un diseño experimental para cada método de extracción, considerando una variedad de variables críticas que influyen en el rendimiento y la calidad del almidón. En el método húmedo, se evaluará el tiempo de sedimentación, temperatura y tiempo de secado. Para el método seco, se estudiarán la concentración de metabisulfito de sodio, tiempo y temperatura de contacto así como tiempo y temperatura de secado. En el método enzimático, se analizará la concentración de la enzima celulasa, tiempo de contacto, temperatura de contacto así como tiempo y temperatura de secado.

Además, se considerarán factores adicionales como el pretratamiento del material vegetal. Este diseño experimental integral permitirá no solo identificar las condiciones óptimas para cada

método, sino también explorar las interacciones entre las variables, facilitando el desarrollo de técnicas replicables para obtener almidón de los rizomas de *Canna indica* L.

Etapas 3. Evaluación de la metodología propuesta para la extracción de almidón.

En esta etapa del estudio, se procederá a la evaluación detallada de las variables establecidas en el diseño experimental, con el objetivo de determinar las condiciones necesarias para la extracción de almidón del rizoma de *Canna indica* L. Este proceso implicará una serie de experimentos, en los cuales se ajustarán y analizarán diversas variables como la concentración de reactivos, el tiempo de sedimentación, el tiempo y las temperaturas de secado así como las de contacto. Se realizarán pruebas para cada método de extracción (húmedo, seco y enzimático), aplicando diferentes combinaciones de estas variables para observar sus efectos en el rendimiento del almidón extraído.

Los datos recolectados serán sometidos a un análisis estadístico para identificar las condiciones que maximicen el rendimiento del almidón, esto permitirá establecer el proceso de extracción que puede ser aplicado no solo al rizoma de *Canna indica* L., sino también a otro tipo de raíces o tubérculos. Por último, cabe destacar que esta etapa es crucial para desarrollar una metodología eficaz para la obtención de almidón a partir de los rizomas de *Canna indica* L., potenciando su valor y su aprovechamiento.

Etapas 4. Implementar inteligencia artificial a los procesos de extracción para el diseño de la metodología.

Con base en los resultados obtenidos en los tres procesos de extracción desarrollados, se procederá a la aplicación de técnicas de inteligencia artificial (IA) para predecir el rendimiento del almidón extraído en cada método. Inicialmente, los datos recopilados durante las etapas experimentales, que incluyen variables como la concentración de reactivos, el tiempo de sedimentación, tiempo y temperaturas de contacto, así como las temperaturas y tiempo de secado, serán organizados y estructurados en un formato adecuado para su análisis. Se utilizarán algoritmos como redes neuronales y bosques aleatorios, para entrenar modelos predictivos que puedan identificar patrones y correlacionarlos en los datos experimentales y estos modelos serán validados.

Posteriormente, se realizarán simulaciones utilizando los modelos entrenados para predecir el rendimiento del almidón bajo diferentes condiciones experimentales, permitiendo así la optimización de los procesos sin necesidad de realizar pruebas adicionales en laboratorio. La integración de la inteligencia artificial, no solo facilitará la identificación de las condiciones óptimas para la extracción de almidón, sino que también ofrecerá una herramienta de gran importancia para la toma de decisiones en tiempo real y la mejora continua del proceso. Además, los modelos predictivos desarrollados podrán ser utilizados para adaptar los procesos a diferentes casos y volúmenes de producción. Es así como la aplicación de técnicas de inteligencia artificial permitirán predecir y obtener el rendimiento del almidón extraído, ofreciendo resultados confiables basados en los datos experimentales obtenidos.

1.7 Alcance de la investigación.

El presente trabajo es de tipo experimental, por lo cual se revisan metodologías y se establecen las condiciones y variables necesarias que se evaluarán para poder establecer un proceso de obtención de almidón del rizoma de *Canna indica* L., la cual es una planta que se encuentra abundantemente en la región de Misantla y representa una maleza (hierba indeseable) entre los agricultores. El desarrollo de este proceso no solo contribuirá al conocimiento científico sobre la *Canna indica* L. y sus propiedades, sino que también ofrecerá un proceso replicable que puede ser adaptado para la extracción de almidón en otras localidades y con otras plantas similares. De esta manera, el trabajo tendrá un impacto significativo en la industria alimentaria y otros sectores, promoviendo el uso sostenible y eficiente de recursos locales, y sirviendo como base para investigaciones futuras y aplicaciones industriales a mayor escala.

1.8 Limitación de la investigación.

En el presente trabajo no se advierte limitación alguna, salvo la información y datos relacionados a la extracción de almidón en rizomas de *Canna indica* L., ya que esta planta no ha sido del todo estudiada por lo que no se encuentran gran variedad de artículos o investigaciones relacionados. Además, de que no hay cultivos bien establecidos de esta planta, pues es considerada maleza entre las cosechas y traspatio, por lo que la recolección se realizará mediante búsqueda en fincas de la zona lo que puede generar variaciones de tamaños, calidades y concentraciones de los rizomas colectados.

1.9 Impacto social, económico y/o ambiental.

Esta investigación será útil, en un futuro, para los agricultores y personas que cuentan con traspatio de esta planta y las cuales, al considerarlas una maleza, son arrancadas, acabando su ciclo de vida, por lo cual los rizomas de esta pueden ser utilizadas para producir almidón, teniendo en cuenta las condiciones necesarias para aprovechar la mayor parte de estos y alcanzar como resultado un buen rendimiento. Cabe destacar que, esta investigación tiene un impacto ambiental positivo, ya que se busca aprovechar al máximo los recursos naturales que son característicos de la región de Misantla.

Capítulo 2. Marco teórico y estado del arte

2.1 Marco teórico

2.1.1 *Canna indica* L.

La Papata silvestre, llamada científicamente *Canna indica* L. o *Canna edulis*., es uno de los cultivos de tubérculos nativos de México, que pertenece a la familia Cannaceae. Es conocida por una variedad de nombres, dentro de los que destacan Achira, Caña de las Indias o Platanillo (Lobo-Arias et al., 2017).



Figura 1 *Canna indica* L. (Fuente: propia).

2.1.2 Denominaciones regionales

De manera general Rzedowski, (1998) menciona algunos nombres como hoja de cuenta, papatla, papatla del monte, papatla silvestre, chancle, chilalaga, chocolón y bandera. Por su parte, Martínez (1979) reporta los nombres de bandera, caña de coro, caña de cuentas, coyol, changara, flor de cangrejo, hierba del rosario.

Nombres como chachalaca, chimalaga, papata y platanillo se usan en Veracruz, mientras que, en la región de Misantla, ubicada en el estado de Veracruz es conocida comúnmente como “papata ratón” o “papata silvestre”.

2.1.3 Origen y distribución geográfica

De acuerdo a Kumbhar et al. (2018), *Canna indica* L., es una planta perenne ornamental, es decir, que se cultiva con fines decorativos, nativa de regiones tropicales de América y otras partes del mundo como China, Vietnam, Taiwán y Tailandia (Gómez-Aldapa et al., 2019). Probablemente, esta planta fue domesticada en la zona andina, desde Colombia hasta Ecuador, dispersándose rápidamente de México hasta Chile, siendo Colombia la zona de dispersión principal de *Canna indica* L.

De acuerdo con Villaseñor y Espinosa (1998), en el país de México se reporta su presencia en los estados de Aguascalientes, Campeche, Chiapas, Colima, Distrito Federal, Durango, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Quintana Roo, San Luís Potosí, Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán. Según (Jiménez, 1980), en el estado de Veracruz, la distribución se concentra en la zona central, abarcando los municipios de Córdoba, Orizaba, Xalapa y Misantla.



Figura 2. Distribución geográfica de *Canna indica* L. en el estado de Veracruz. Fuente: (Jiménez, 1980).

2.1.4 Estructura

La “papata” (*Canna indica* L.) es una planta herbácea robusta de 0.5 a 3.5 m de altura provista de rizomas horizontales gruesos e intrincados; hojas prolongadas en su base en una larga vaina, que envuelve al tallo (Rzedowski, 1998.)

Esta planta es perecedera de la región de Misantla, se conoce comúnmente como papata ratón, entre cultivos es considerada una maleza o hierba indeseable, por lo que los agricultores optan por arrancarla y desecharla.

Canna indica L. presenta hojas alternas y simples de color verde pálido, con una lámina ovalada-elíptica a ovalada-oblonga que mide entre 15 y 65 cm de largo y entre 10 y 30 cm de ancho. Los bordes de las hojas son lisos, con un ápice puntiagudo y una base que puede ser redondeada, corta y envolvente o abruptamente alargada en la vaina.

La corola, poco extendida, tiene un tubo más corto que los sépalos, formado por las bases de tres pétalos erectos, que suelen ser de color rojo con matices amarillos y amarillo pálido. El labelo es lineal a estrechamente oblongo, midiendo entre 5 y 6 cm de longitud y entre 0.6 y 0.8 cm de ancho, y es más pequeño que los estaminodios, a veces de color amarillo con manchas rojas, frecuentemente de tonos rojizos a naranjas.

El estambre fértil es rojizo a amarillo, de 5.5 a 7 cm de largo. Los numerosos óvulos y el estilo lineal, de hasta 6 cm de largo, también son de color rojo a amarillo. El fruto es una cápsula ovalada a irregularmente elipsoide, de 2 a 7 cm de largo y 1.5 a 2.5 cm de ancho, densamente verrugosa, con dehiscencia longitudinal. Cada fruto contiene generalmente 18 semillas esféricas de color café oscuro a negro (Jiménez, 1980).

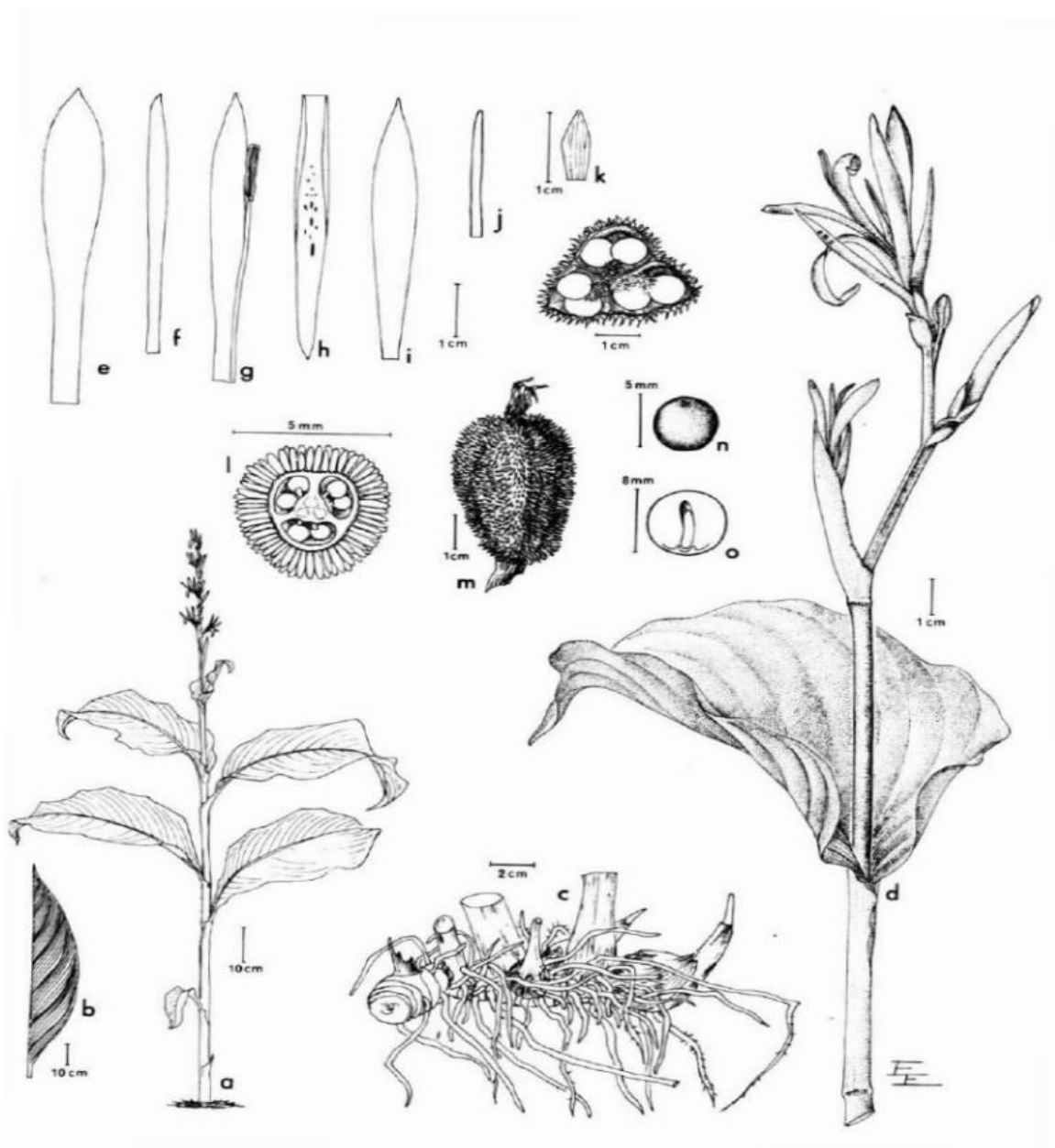


Figura 3. Estructura de *Canna indica* L. a) planta, b) detalle de la hoja, e) rizoma; d) rama con inflorescencia, e) estaminodio, f) estilo, g) estambre; h) labelo; i) pétalo, j) estaminodio rudimentario, k) sépalo; l) corte transversal de ovario, m) fruto, n) corte transversal de fruto; ñ) semilla, o) embrión. Fuente: (Elvia Esparza A basada en el ejemplar Jiménez 200).

2.1.5 Raíz

Usualmente, las raíces de *Canna indica* L., son pequeñas formaciones en tamaño y tienen una forma cilíndrica, además de presentar un color blanco que las hace fácilmente distinguibles. Su función principal es la absorción de agua y nutrientes del suelo, lo que las convierte en elementos esenciales para la nutrición de la planta. La longitud de estas estructuras puede experimentar cambios considerables, variando entre 8 y 24 centímetros, y esta variación está determinada en gran medida por el tipo de material del que están compuestas (Torres, 2004).

2.1.6 Tallo

El tallo subterráneo de esta planta es comúnmente conocido como rizoma, la cual es una estructura que se ramifica y produce brotes aéreos, formando agrupaciones conocidas como macollas. El rizoma se extiende horizontalmente y puede generar múltiples niveles de crecimiento, lo que permite que una sola planta tenga rizomas de diferentes órdenes. Esta capacidad de crecimiento en profundidad y expansión horizontal permite a la planta colonizar eficientemente nuevas áreas de suelo.

Las características físicas de los rizomas, como su longitud, peso y diámetro, están determinadas genéticamente, lo que implica que diferentes variedades o cultivares de la misma especie pueden tener rizomas con propiedades distintas. Esta variación genética afecta la adaptabilidad y robustez de la planta, ya que rizomas más grandes pueden almacenar más nutrientes y sobrevivir mejor a condiciones adversas (Torres, 2004).

Además, la propagación a través de rizomas permite a la planta regenerarse rápidamente tras ser dañada, asegurando su supervivencia y expansión continua. Esta estrategia de crecimiento es común en muchas gramíneas y plantas perennes, que utilizan los rizomas para propagarse, ocupar más espacio y almacenar recursos para afrontar periodos de estrés.

2.1.7 Hojas

La morfología foliar de la *Canna indica* L., se caracteriza por presentar láminas de estructura simple, carentes de divisiones o segmentos. Estas hojas están compuestas por una

vaina envolvente ubicada en la base del eje caulinar, a partir de la cual se desarrolla una lámina de contorno elíptico que exhibe una nervadura central prominente, principalmente observable en la superficie posterior (Torres, 2004).

La coloración de estas hojas muestra una tonalidad verde clara en la cara inferior, contrastando con un tono más oscuro en la superficie superior.

Este tipo de composición foliar es común en numerosas especies vegetales, y suele asociarse a estrategias de crecimiento y expansión vegetativa a través de estructuras subterráneas como rizomas.

2.1.8 Flor

De acuerdo a Torres (2004), sus flores son vistosas ya que los colores varían entre rojos, amarillos, naranjas. El cáliz tiene tres sépalos con entre 1-1.5 cm de longitud; la carola tiene tres pétalos delgados de entre 4 a 5 cm de largo y tres estambres, el pistilo tiene un ovario ínfero trilocular.

2.1.9 Fruto

Esta planta se reproduce de forma vegetativa a través de rizomas que presentan puntos de crecimiento. Estos rizomas son tallos subterráneos que se encargan de la propagación y reproducción de la planta. Además de permitir la reproducción, estos rizomas también producen almidón, un carbohidrato de reserva que la planta utiliza como fuente de energía.

2.1.10 Hábitat

Canna indica L., es de bajo mantenimiento y fáciles de cultivar, por lo que se adapta a una gran variedad de climas. Se desarrolla en regiones con lluvias desde 250 hasta 4000 mm al año y entre 16 y 32 °C de temperatura, es decir, en climas cálidos. Los mayores rendimientos se han obtenido entre los 18 a 24 °C. Por debajo de la mínima, el granizo y las heladas ocasionan daños al cultivo inhibiendo la fotosíntesis, mientras que, por encima se acelera la pérdida de agua y no hay acumulación de carbohidratos en el rizoma. Por lo que, el suelo debe ser rico en materia orgánica.

Esta planta llega a medir hasta 3 m de altura, pero su mayor rendimiento se obtiene entre los 0.5 y 1.5 m. Requiere gran luminosidad para realizar la fotosíntesis y obtener buena producción de almidón. (Bonelles, 2017).

2.1.11 Importancia socioeconómica

El impacto tanto social como económico de *Canna indica* L. es en gran medida positivo, ya que representa una fuente de almidón mediante sus rizomas, el cual es beneficio para muchas personas de las zonas rurales pues ha sido considerada de importancia estratégica para las áreas de economía campesina, el mejoramiento de la dieta de la población, la oportunidad de generar valor agregado significativo y el desarrollo sostenible de la agroindustria panificadora entre otras. Además, dado que este almidón es fácilmente digerido, puede ser empleado como alimento de infantes, ancianos y enfermos (Marcelo & Arambarri, 2019). Además, ofrece beneficios estéticos a las personas a partir de sus flores.

Debido a que los productos realizados con el almidón de *Canna indica* L., son productos de símbolo regional para Colombia, se han logrado posicionar en el mercado local y nacional y se ha llegado a comenzar su exportación hacia Norteamérica, Centroamérica y otros países con potencial crecimiento de la demanda (Lobo-Arias et al., 2017), esto debido a su bajo costo de producción, se puede aprovechar en la región de Misantla, ya que, lo que comúnmente lo que se explota de la papata son sus hojas, dejando de lado el almidón, con el cual se podrían producir diversos alimentos ayudando a la economía de los agricultores así como explorando un nuevo mercado que aún no ha sido introducido en la región.

2.1.12 Usos

Una de las principales funciones de *Canna indica* L., es la alimenticia, pues de sus rizomas de dicha planta se obtiene el almidón, cuya extracción se puede realizar mediante procesos de agroindustria rural, el cual es utilizado para la elaboración de bizcochos y otros productos artesanales. El cultivo de *Canna indica* L., y la extracción de su almidón, representan actividades importantes para la economía en Colombia (Torres, 2004). Además, en países como Vietnam, Taiwán y el sur de China se ha comenzado a expandir, en donde se siembra para el

procesamiento de fideos transparentes. Cabe señalar que esta planta también ha tenido una rápida dispersión desde México hasta el norte de Chile.

Según Caicedo et al. (2003), la especie ha sido considerada de importancia estratégica para la generación de empleo rural, el mejoramiento de la dieta de la población, la oportunidad de generar valor agregado significativo, el desarrollo sostenible de la agroindustria panificadora y la posible generación de divisas por exportación futura de productos y subproductos.

Además, en la industria de productos enlatados, en la elaboración de salsas, como relleno en productos dietéticos y en la elaboración de gomas dulces, entre otros.

Otras aplicaciones son en la industria farmacéutica, su principal uso es como agente de relleno en las pastillas de medicamento, además constituye un agente nutricional para infantes, siendo, además, antibacteriano, antiabortivo, antialérgico, anticancerígeno, antihemorrágico nasal, antiséptico, antioxidante, astringente, contra úlceras, contra ictericia aguda, digestivo, diurético y emoliente (Martínez Crovetto, 1981).

En la industria textil, para almidonar prendas y para lograr adhesión de las fibras que constituyen las prendas. Finalmente, tiene una función decorativa, la cual se ha explotado en los últimos años e incluso ha trascendido fronteras.

2.1.13 Rizoma

Las raíces y rizomas de *Canna indica* L., son gruesas, cilíndricas y blancas, miden entre 2 y 5 mm de diámetro y tienen numerosas pequeñas raicillas a su alrededor. Dichos rizomas pueden ser simpodiales, estoloníferos o tuberosos (Kumbhar et al., 2018).

Esta planta, de acuerdo a Andrade-Mahecha et al., 2012, forma parte de las 25 fuentes de consumo de almidón, el cual es uno de los polímeros de carbohidratos naturales más abundantes y no es alergénico, reconocido como seguro y de bajo costo. En los trópicos, el almidón de *Canna indica* L. se utiliza principalmente en la industria alimentaria para la producción de alimentos como fideos, en salsas, condimentos y sopas como agente espesante, es decir, que a estos productos les proporciona apariencia, textura y forma.

Según lo descrito por Andrade-Mahecha et al., (2012), el almidón de *Canna* se caracteriza por sus gránulos muy grandes, alta viscosidad, alta retrogradación, y dichas propiedades lo convierten en un producto potencialmente interesante para su uso como agente espesante.

2.1.14 Anatomía

El rizoma de *Canna indica* L. es un tallo subterráneo que crece horizontalmente, lo cual permite que la planta se propague fácilmente. Superficialmente, el rizoma cuenta con una epidermis que actúa como barrera protectora, esta puede ser lisa o un poco rugosa, con nudos y entrenudos visibles, así como brotes que pueden desarrollarse en nuevos tallos y raíces en otras partes distintas.

La eficiente estructura interna del rizoma le permite almacenar grandes cantidades de almidón, lo que lo hace valioso para usos industriales y alimenticios. Además, la capacidad de las yemas en los nudos para producir nuevos brotes facilita la regeneración y expansión de la planta, asegurando su supervivencia y propagación en distintos entornos, almacenando de esta manera nutrientes.



Figura 4. Rizoma de *Canna indica* L. (Fuente: Propia).

2.1.15 Composición química

El rizoma de la papata contiene un 75 % de agua y un alto contenido de fibras (Barrera et al., 2003). Así mismo, mencionan que la materia seca del rizoma, presenta un 53.63% de almidón, 4.92% de azúcar (principalmente glucosa y sacarosa), 4.43% de proteínas y un alto contenido de potasio.

En cuanto análisis proximal, el cual es usado para expresar la calidad nutritiva del alimento en este caso del rizoma de *Canna indica* L., Espín et al. (2000) reportan que el contenido de humedad se encuentra en 82.30%, 10.54% de cenizas, 8.10% de fibra, 1.13% de grasa cruda y un contenido total de carbohidratos de 75.8%.

Además, también es rico en aminoácidos, principalmente de isoleucina, histidina, leucina, lisina y treonina. Contiene minerales como calcio, hierro, potasio y magnesio, de acuerdo a lo reportado por Espín et al. (1999).

2.1.16 Funciones

Algunas de las funciones de *Canna indica* L., reside en sus rizomas, los cuales pueden ser consumidos crudos, aunque generalmente se cocinan. Principalmente son utilizados para la extracción de almidón.

Los rizomas pueden cosecharse a los 4 meses, pero se obtienen mayores rendimientos a los 8 meses. Los rizomas recién cosechados deben manejarse con cuidado y consumirse rápidamente ya que tiende a oxidarse. Los rizomas pueden almacenarse varias semanas en lugares frescos y secos, o más tiempo si se mantienen sin heladas y no demasiado secos (Barrera et al., 2003).

Los brotes jóvenes son comestibles como verduras, y las hojas se utilizan para envolver alimentos, como en la región de Misantla, Veracruz, las hojas más grandes o incluso de otras especies de *Canna*, se utilizan para envolver o conservar alimentos. Además, se pueden utilizar como platos. *Canna indica* L. también se cultiva como planta decorativa por sus atractivas flores y follaje. Las semillas se usan como cuentas y en instrumentos de percusión. Los tallos y hojas

fumigados son insecticidas. *C. indica* también se usa en el tratamiento de aguas residuales como en humedales construidos.

Los rizomas y el follaje molidos se usan también como alimento para el ganado (Popenoe et al., 1989). De acuerdo a lo descrito por Hurrell et al. (2005), debido a su apariencia elegante, se cultiva como planta ornamental, además de emplearse como cerco vivo y cortina protectora contra el viento.

En farmacología, esta especie se usa como un suplemento nutricional para niños y tiene propiedades antibacterianas, alivia alergias, combate el cáncer, detiene hemorragias nasales, lucha contra la malaria, es antiséptica, antioxidante, astringente, trata úlceras y la ictericia aguda, mejora la digestión, es diurética y suavizante (Hernández et al., 2024). Además, en la medicina tradicional, el té hecho con sus raíces tiene efectos abortivos, alivia el asma, combate infecciones urinarias, trata problemas de los riñones y actúa como diurético.

En la industria papelera, el almidón es comúnmente llamado "almidón no modificado" porque en este tipo de industria se ocupa que el almidón cumpla con ciertas características como alta blancura, bajo contenido de fibra y pocas impurezas. Este almidón también se utiliza como adhesivo en el laminado de papeles y cajas corrugadas. Además, en la industria de explosivos, se emplea para la producción de alcoholes, glucosa y acetona (Cobana & Antezana, 2007).

El general, el rizoma se usa como producto alternativo en el sector alimentario (pan, aditivos, espesantes, pastas), farmacéutico (agente aglutinante y excipiente), textil (acabado de telas), papelero (consistencia y firmeza de papel), industria de polímeros (biopelículas) e industria cosmética (maquillajes y cremas faciales).

2.1.17 Almidón

El almidón es el polisacárido más utilizado en la industria alimentaria, como ingrediente esencial, por su gran versatilidad y su costo relativamente bajo, se emplea como: agente espesante., es decir, para proporcionar apariencia, consistencia o forma al alimento. También se utiliza como elemento ligante y agente de relleno. Fonseca-López et al. (2019), indican que los rizomas de *Canna indica* L., son comúnmente utilizados para extraer almidón.

El almidón está formado por dos tipos de polisacáridos: la amilosa y la amilopectina. De acuerdo a Hernández-medina et al. (2008), la amilosa es una cadena lineal de unidades de glucosa unidas principalmente por enlaces α , aunque a veces también tiene enlaces α . No se disuelve en agua, pero puede formar estructuras llamadas micelas hidratadas al unirse con moléculas vecinas a través de puentes de hidrógeno. Por otra parte, la amilopectina, es una cadena ramificada de glucosa, con un 94-96% de enlaces α y un 4-6% de enlaces α . Estas ramificaciones aparecen cada 15-25 unidades de glucosa aproximadamente.

En general, estos polisacáridos pueden ir en proporciones que van desde el almidón normal (18-30% de amilosa) hasta almidón con alto contenido de amilosa (alrededor de 70%). (Medina, 2010).

- Amilosa

La amilosa es un polímero compuesto por unidades de glucosa unidas principalmente por enlaces α . De acuerdo a Quiroga Ledezma (2008), su tamaño es considerable, cuenta con un peso molecular que oscila entre 10^5 y 10^6 Da, y una cadena que puede contener entre 200 y 2,000 unidades de glucosa.

Debido a que su estructura es lineal, la amilosa se considera que es flexible y puede formar enlaces de hidrógeno con otras moléculas de amilosa, lo que le permite organizarse en estructuras paralelas. Si bien es considerada como un polímero lineal, la amilosa presenta algunas ramificaciones, las cuales son mínimas y no afectan su comportamiento en solución.

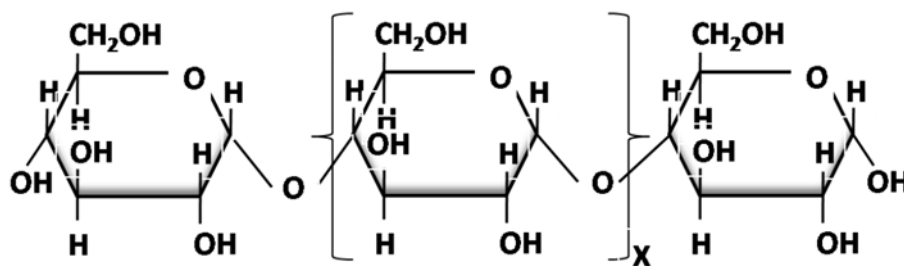


Figura 5. Estructura química de la amilosa. Fuente: (Quiroga Ledezma, 2008).

El contenido de amilosa en los almidones varía considerablemente, ya que, si bien la mayoría contiene entre 20% y 30% de amilosa, existen almidones con porcentajes mucho

menores, incluso nulos, a los cuales se les denomina almidones céreos, por el contrario, pueden existir almidones con contenidos muy altos, que llegan incluso hasta un 85%.

- Amilopectina

La amilopectina es un componente fundamental del almidón y se compone de unidades de glucosa (α -D-glucosa) unidas por enlaces α en los puntos de ramificación. Tiene un peso molecular que oscila entre 10 millones y 1 mil millones de Daltons, y cada ramificación contiene alrededor de 20 a 30 unidades de glucosa. La amilopectina tiene un grado de polimerización de aproximadamente 2 millones de unidades, lo que la convierte en una molécula de gran tamaño. Su estructura ramificada limita su movilidad y dificulta la formación de enlaces de hidrógeno entre las moléculas debido a la falta de orientación adecuada y proximidad suficiente.

El gránulo de almidón contiene regiones alternadas de zonas cristalinas y no cristalinas, y es el ordenamiento de las cadenas de amilopectina el que forma las regiones cristalinas.

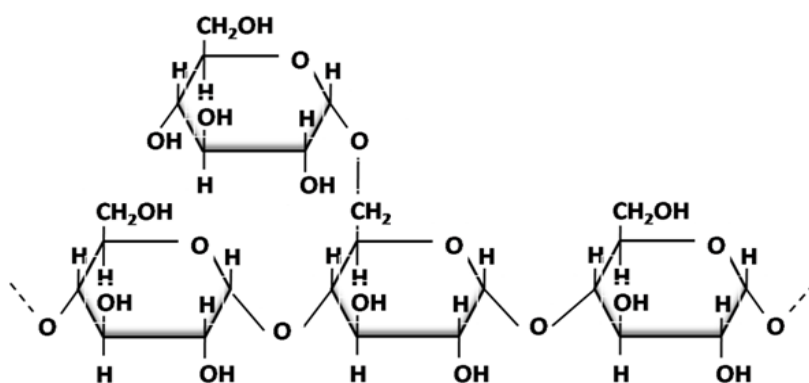


Figura 6. Estructura química de la amilopectina. Fuente: (Quiroga Ledezma, 2008).

El almidón se obtiene mayoritariamente del maíz, el trigo, el arroz, la papa y la yuca, a los cuales se les nombra almidones naturales. Si proviene de un tubérculo suele denominarse fécula (fécula de papa); si es de un cereal, almidón. Las propiedades del almidón varían en función del producto del cual se extrae y de la variedad. Ello se debe a la longitud de las cadenas y, sobre todo, a la proporción de los dos tipos de cadenas que lo forman. (Castells, 2009).

2.1.18 Tipos de almidón

Uno de los aspectos principales para clasificar los tipos de almidón reside en su digestión, la cual, tanto para la amilosa como para la amilopectina, está mediada por amilasas, dextrinasas y disacaridasas que actúan hidrolizando el almidón a monómeros de glucosa, los cuales se absorben directamente a través de la mucosa intestinal.

De acuerdo a Villarroel Heise et al. (2018), la digestibilidad del almidón depende de la estructura del gránulo nativo, el cual tiene una disposición semicristalina compleja y altamente ordenada. Uno de los principales factores que afectan la digestibilidad del almidón y su respuesta fisiológica se atribuye al tamaño del gránulo, la estructura molecular y la relación amilosa/amilopectina, además del origen de la planta que determina la organización y la morfología cristalina.

En general, los almidones de tubérculos son más resistentes a la hidrólisis enzimática que los almidones de cereales debido a su alto contenido de residuos de fosfato, sus gránulos de almidón más grandes con una mayor superficie, sus propiedades de superficie reportadas in vitro e in vivo, su estructura supramolecular y, en parte, a una estructura cristalina diferente.

De acuerdo al índice y grado de digestión in vitro, los almidones se han clasificado en tres fracciones principales: almidón rápidamente digerible (la porción digerida en los primeros 20 minutos de incubación), almidón lentamente digerible (la porción digerida de 20 a 120 minutos) y almidón resistente (la parte restante que no puede ser digerida) (Villarroel Heise et al., 2018).

El almidón lentamente digerible es típico de todos los cereales. Los almidones aislados de tubérculos, típicamente de achira, papas y plátanos, forman parte de los almidones de fácil digestión, esto hace que el almidón sea mucho más resistente a la degradación por enzimas en comparación con el almidón de digestión lenta.

2.2 Estado del arte

El almidón de *Canna indica* L. contiene, de acuerdo a (Barrera et al., 2003), aproximadamente un 27% de amilosa y un 73% de amilopectina. En cuanto a sus propiedades

fisicoquímicas, algunos autores han realizado estudios de los parámetros más importantes, con el fin de caracterizarlo y diferenciarlo sobre las otras especies de tuberculos. Algunos de los estudios realizados incluyen, la determinación de humedad, grasa cruda, proteína, cenizas, azúcares reductores, poder de hinchamiento, índice de solubilidad, índice de gelatinización, entre otros. A continuación, se enlistan los valores fisicoquímicos determinados por distintos autores en almidón obtenido del rizoma de *Canna indica l.*

Tabla 1. Características fisicoquímicas del almidón de rizoma de *Canna indica l.* Elaboración: Propia.

Características	Almidón				
Materia seca (%)	93.01 ± 1.96	-	-	-	-
Humedad (%)	6.99 ± 1.96	97.6 ± 0.5	83.5 ± 0.9	82.9	77.5
Cenizas (%)	0.22 ± 0.02	5.3 ± 0.8	2.2 ± 0.1	1.6	1.2
Proteína (%)	1.75 ± 0.01	6 ± 0.4	8.1 ± 0.6	2.2	1.1
Extracto etéreo (%)	0.43 ± 0.02	1.5 ± 0.1	0.5 ± 0.02	0.3	0.4
Azúcares reductores (mg/g)	0.12 ± 0.01	-	-	-	-
Azúcares no reductores (mg/g)	0.08 ± 0.01	-	-	-	-
pH	5.91 ± 0.01	-	-	-	-
Temperatura de gelatinización (°C)	62.08 ± 1.83	-	-	67.8	67
Índice de abs. de agua (g agua/g almidón)	4.41 ± 0.1	-	-	-	-
Índice de solubilidad en agua (%)	0.14 ± 0.01	-	-	-	-
Poder de hinchamiento (g agua/g almidón)	4.43 ± 0.1	-	-	-	-
Referencias	Fonseca-López et al. (2020)	Andrade-Mahecha et al. (2012)		Cisneros et al. (2009)	

El almidón de *Canna indica l.*, presenta características distintivas en comparación a otros tipos de almidón de origen vegetal. Mientras que la mayoría de los almidones de cereales y tubérculos comparten patrones de cristalinidad similares, el almidón de achira se destaca por su estructura cristalina única y su comportamiento particular frente a la digestión enzimática. El almidón de *Canna indica l.* tiene el mayor porcentaje de amilosa, más o menos cuenta entre 31

a 38, además tiene partículas de una gran variedad de tamaños (30- 100 μ m) (León et al., 2013). En comparación con los gránulos de otras especies vegetales como el maíz, trigo, yuca y papa, los cuales miden entre 10-30 μ m, *Canna indica l.* posee el granulo más grande. Por esta razón es digerido fácilmente por el organismo y posee un alto grado de proteína; además es resistente a esterilización. (Yépez, 2012).

Tabla 2. Características químicas del almidón de *Canna indica* l con otros tubérculos y raíces. Fuente: (Dorantes-Fuertes et al., 2024)

	Tamaño de partícula (μm)	Solubilidad (%)	Poder de hinchamiento (%)	Estabilidad	Turbidez	Temperatura de gelatinización (°C)	Capacidad de absorción de agua (g/g)	Densidad (g/cm3)	Capacidad de absorción de aceite (g/g)	Referencias
Anchote (<i>Coccinia abyssinica</i>)	ND	5,03	5.781	1,348	1,134	53,33	200	0,605	300%	Etalesma et al. (2023)
Ariá (<i>Goeppertia allouia</i>)	10,0	ND	ND	ND	ND	8,46	ND	ND	ND	Domingos et al. (2021)
Ocumo criollo (<i>Xanthosoma sagittifolium</i> (L.) Schott)	2,2 -10,4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	Palomino et al. (2010)
Ocumo chino (<i>Colocasia esculenta</i> (L.) Schott)	0,4 -12,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
Yuca (<i>Manihot esculenta</i>) variedad "Valencia"	14,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	Vargas Aguilar et al. (2012)
Yuca (<i>Manihot esculenta</i>) variedad "brasileña"	12,8	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
Makal	12,40	ND	28,56	ND	ND	78,4	ND	ND	ND	Hernández-Medina et al (2007)
Papa	12,41	ND	25,53	ND	ND	61,3	ND	ND	ND	
Yuca	16,50	ND	58,83	ND	ND	65,2	ND	ND	ND	
Sagú	10,64	ND	16,98	ND	ND	74,9	ND	ND	ND	
<i>Xanthosoma sagittifolium</i> (tannia)	2.0–12.5	ND	ND	ND	ND	93,8	ND	ND	ND	Pérez et al. (2005)

<i>Colocasia esculenta</i> (taro)	0.5–5.0	ND	ND	ND	ND	89,7	ND	ND	ND	Pérez et al. (2005) Cisneros et al. (2009)
Andean Achira (<i>Canna edulis</i>)	ND	ND	ND	79	ND	67,8	ND	ND	ND	
Papa blanca	>40	ND	ND	ND	ND	74,8	15,0	ND	12,0	Oluwatooyin et al. (2003)
Papa roja	>40	ND	ND	ND	ND	75,7	15,0	ND	10,0	
<i>Canna indica</i> L.	ND	0,15	4,39	ND	ND	75,6	4,37	ND	ND	Fonseca-López et al. (2019)
Mapuey (<i>Dioscorea trifida</i>) variedad purpura	30,33	1,00	4,18	ND	ND	77,5	3,18	ND	ND	Bou Rached et al. (2006)
Mapuey (<i>Dioscorea trifida</i>) variedad blanca	34,15	3,21	7,93	ND	ND	75,1	6,93	ND	ND	Bou Rached et al. (2006) Zárate-Polanco et al. (2014)
Inhambu (<i>Dioscorea trifida</i> L.)	5.06 - 15.44	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
Ñame morado (<i>Dioscorea trifida</i>)	24.11 - 45.37	ND	ND	ND	ND	90,02	ND	ND	ND	Lopes-Santos et al. (2021)
Achira (<i>Canna indica</i> L.) variedad brasileña	13-128	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	Andrade-Mahecha et al. (2012)
Achira (<i>Canna indica</i> L.) variedad colombiana	13-90,5	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	

Tabla 3. Características composicionales del almidón de *Canna indica* L. con otros tubérculos y raíces. Fuente: (Dorantes-Fuertes et al., 2024).

	Amilosa (%)	Amilopectina (%)	Ph	Humedad (%)	Ceniza (%)	Proteína cruda (%)	Lípidos (%)	Fibra (%)	Retrogradación	Grasa (%)	Carbohidratos totales (%)	Fosfóro (%)	Azúcares totales (%)	Materia seca (%)	Azúcares reductores (mg. g ⁻¹)	Azúcares no reductores (mg. g ⁻¹)	Nitrógeno	Referencias
Anchote (<i>Coccinia abyssinica</i>)	ND	ND	4,44	11,5	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	Etelema et al (2023)
Ariá (<i>Goeppertia allouia</i>)	39	ND	ND	8,45	0,15	2,4	0,39	2,02	58,3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	Domingos et al (2021)
Ñame (<i>Dioscorea rotundata</i> P.)	26,78	73,22	ND	8,26	0,48	7,64		0,88		0,28	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	Tejada-Tovar et al (2018)
Ocumo criollo (<i>Xanthosoma sagittifolium</i> (L.) Schott)	26,17	ND	ND	10,82	0,09%	ND	ND	ND	ND	0,28	ND	0,09	0,05	ND	ND	ND	ND	Palomino et al (2010)
Ocumo chino (<i>Colocasia esculenta</i> (L.) Schott)	12,69	ND	ND	9,47	0,19	ND	ND	ND	ND	0,33	ND	0,12	0,05	ND	ND	ND	ND	
Yuca (<i>Manihot esculenta</i>) "Valencia"	38,1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	Vargas Aguilar et al (2012)
Yuca (<i>Manihot esculenta</i>) "Brasileña"	37,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	Hernández-Medina et al (2007)
Makal	23,6	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
Papa	19,6	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
Yuca	17	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
Sagú	22,69	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	Sobini et al (2022)
Palmyrah (<i>Borassus flabellifer</i> L.)	18,77	81,23	ND	10,36	0,07	0,53	ND	0,34	ND	0,14	88,08	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
<i>Xanthosoma sagittifolium</i> (tannia)	35,34	ND	ND	13,43	0,20	0,56	ND	ND	ND	0,1	ND	0,07	0,08	ND	ND	ND	ND	Pérez et al (2005)
<i>Colocasia esculenta</i> (taro)	30,62	ND	ND	14,01	0,31	0,53	ND	ND	ND	0,27	ND	0,01	0,04	ND	ND	ND	ND	
Andean Achira (<i>Canna edulis</i>)	33,1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	Cisneros et al (2009)
Papa blanca	32,15	ND	ND	5,46	0,20	4,38	ND	0,00	ND	2,21	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	Oluwatoyin et al (2003)
Papa roja	34,16	ND	ND	4,82	0,30	5,56	ND	0,00	ND	2,28	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
<i>Canna indica</i> L	ND	ND	5,91	6,99	0,22	1,75	ND	ND	ND	0,43	ND	ND	ND	93,01	0,12	0,08	ND	Fonseca-López et al (2019)
Mapuey (<i>Dioscorea trifida</i>) morado	43,33	56,67	4,12	11,49	0,11	0,06	ND	0,0031	ND	0,02	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,009	Bou Rached et al (2006)
Mapuey (<i>Dioscorea trifida</i>) blanco	34,72	65,28	4,25	9,05	0,07	0,36	ND	0,0173	ND	0,07	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,06	
Clones de papa criolla (<i>Solanum tuberosum</i> , Phureja Group)	14,05 - 49	51 - 85,95	ND	14,4 - 21,67	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	15,06 - 22,57	19,17 - 26,42	1,46 - 6,39	ND	ND	Zárate-Polanco et al (2014)
Inhambu (<i>Dioscorea trifida</i> L.)	36,82	47,74	5,92	12,80	0,52	0,43	ND	ND	ND	0,17	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
Ñame morado (<i>Dioscorea trifida</i>)	5,70	ND	5,6	7,80	0,09		0,30	ND	ND	ND	91,8	ND	ND	ND	ND	ND	ND	Lopes-Santos et al (2021)
<i>Dioscorea remotiflora</i>	ND	ND	ND	6,29	0,44	0,67	1,2	ND	ND	ND	97,67	0,49	ND	ND	ND	ND	ND	Guízar-Miranda et al (2008)
<i>Dioscorea sparsiflora</i>	ND	ND	ND	7,52	0,73	1,22	0,55	ND	ND	ND	97,46	0,32	ND	ND	ND	ND	ND	
Achira (<i>Canna indica</i> L.) brasileña	39	ND	ND	9,76	0,53	0,60	0,15	0,86	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	Andrade-Mahecha et al (2012)
Achira (<i>Canna indica</i> L.) colombiana	40,76	ND	ND	8,35	0,22	0,81	0,05	0,82	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	

Se observa que cada tubérculo y raíz difiere en sus características químicas y composicionales, en donde el tamaño de la partícula de *Canna indica* l. es una de las principales diferencias con la del resto de los tuberculos, pues esta es mucho mayor. También, el índice de solubilidad es mucho menor que las demás, mientras que la temperatura de gelatinización se encuentra dentro del promedio y la capacidad de absorción de agua es muy bajo en comparación con los otros tuberculos y raíces.

En tanto a sus características composicionales, el contenido de amilosa es alto con un 40.76%, mientras que humedad, ceniza, proteína, lípidos y fibra están dentro del promedio.

2.2.1 Métodos de extracción de almidón

La extracción del almidón puede llevarse a cabo tanto a nivel artesanal como a un nivel más tecnificado y con diferentes escalas de producción. Existen diversos métodos de extracción aplicables a cualquier tipo de almidón natural. Además de los métodos tradicionales existen los métodos mecánicos que es la combinación de métodos tradicionales utilizando equipos como centrífuga, también se han desarrollado técnicas más avanzadas, como la extracción enzimática (utilizando celulasas), extracción utilizando agentes químicos y el método asistido por ultrasonido.

Entre los métodos tradicionales más comúnmente utilizados se encuentran la extracción por vía húmeda y la extracción por vía seca, cada uno de estas técnicas presenta sus propias características y ventajas las cuales dependen del tipo de materia prima a la cual se le desea realizar la extracción de almidón.

2.2.2 Vía húmeda

El proceso del método de extracción de almidón, por lo general, consiste en acondicionar la materia prima a extraer, mediante, lavado y pelado, esto con el fin de remover impurezas que puedan afectar o alterar la extracción del almidon, después se tritura o muele con agua o algún otro agente que ayude a romper las estructuras celulares y así poder liberar el almidon. Seguido de la adición de agua para formar una suspensión, la cual debe mantenerse en reposo para que

se logre sedimentar todo el almidón posible, se realizan ciclos de lavado a fin de purificar el almidón sedimentado hasta eliminar el exceso de agua. Finalmente, se lleva a secado por aire caliente para ser almacenado.

Fonseca-López et al. (2019), realizaron un estudio con el rizoma de *Canna indica* L. en el cual compararon dos métodos por vía húmeda uno por licuado (LI) y otro por rallado (RA). El método de extracción por licuado (LI) consistió en cortar los rizomas en trozos pequeños y luego licuarlos con agua destilada. Posteriormente, se dejó en suspensión por 3 horas, se retiró la fibra y el almidón sedimentado se filtró en una malla. Luego, el almidón se llevó a secado a 60 °C. Por otro lado, el método de extracción por rallado (RA) consistió en rallar los rizomas de *Canna indica* L. y luego depositarlos en vasos de precipitado con agua destilada. Esta suspensión se dejó reposar por 3 horas, para después retirar la fibra y el almidón sedimentado se filtró. Se hicieron tres lavados con agua destilada y se dejó secar a temperatura ambiente por 48 horas. Al almidón obtenido se le realizaron pruebas químicas como temperatura de gelatinización, índice de absorción de agua, índice de solubilidad en agua y poder de hinchamiento. Los resultados obtenidos demostraron que el método utilizado para extraer el almidón afectó tanto la temperatura de gelatinización (TG), debido a efectos mecánicos y cambios en el pH del sobrenadante. El almidón de *Canna indica* L. obtenido por licuado necesitó una temperatura más baja para gelatinizar en comparación con el almidón extraído mediante rallado.

Otra técnica por vía húmeda se realizó en papa, yuca y camote, esta incluyó las etapas de preparación de la materia prima, en el cual se pesó y peló 1 kg de papa, yuca y camote, se lavaron y se limpiaron para eliminar las impurezas. Las muestras se rallaron con un raspador, después se sumergieron en agua y se dejaron reposar durante 24 horas para obtener la mayor cantidad de almidón de cada muestra. Las muestras se cernieron y exprimieron para obtener el almidón precipitado, el cual se colocó sobre hojas de periódico para la absorción de humedad, se secó y se pesó. Por último, se filtró la mezcla mediante un filtro de tela, se dejó reposar el filtrado durante tres horas, se enjuagó y se dejó sedimentar de nuevo. El almidón lavado se tamizó por segunda vez para eliminar los últimos restos de fibra y se dejó sedimentar por tres horas para luego eliminar el sobrenadante (Callisaya & Mendoza, 2022).

Para la obtención del almidón de malanga (Torres Rapelo et al. 2013) se utilizaron rizomas frescos de malanga de variedad blanca y morada, los cuales se pelaron y se cortaron en cubos;

luego se molieron durante 2 minutos, para reducir el tamaño de partícula. La lechada de almidón fue filtrada en malla número 80, para eliminar la fibra y otras partículas; el filtrado se dejó sedimentar por 4 horas a 4 °C. Transcurrido este tiempo, el líquido sobrenadante se decantó y la lechada de almidón se lavó tres veces con agua destilada, centrifugando en el último lavado, con la finalidad de recuperar el almidón sobrenadante. Posteriormente, se secó a 55 °C, durante 24 horas y finalmente el almidón se almacenó.

Otro procedimiento para extraer almidón de Taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) descrito por Aboubakar et al. (2008) consiste en sumergir 100 g de harina de taro en una solución acuosa a 35 °C durante 12 h. La suspensión obtenida se homogeneiza durante 30 minutos, luego se tamiza utilizando un tamiz de 150 μ m y se mantiene hasta que sedimente durante 24 h. Luego se recoge el almidón y se lava dos veces con agua, se seca durante 48 h en un horno a 50°C y se almacena en bolsas de selladas.

Cabe mencionar, que, para la extracción del almidón por vía húmeda, es agente en el cual es sumergido el producto, juega un papel importante ya que se puede variar el agente y la concentración de este para obtener almidón.

Por otra parte, el rendimiento de almidón que ofrece este método es significativo, pues de acuerdo Callisaya & Mendoza (2022), el estudio que hicieron a partir de la extracción de papa, yuca y camote indica que, de un peso inicial de 1 kg de cada producto, se obtuvo un total de 97.20 g de almidón de papa, 204.00 g de almidón de yuca y 95.10 g de almidón de camote. Estos demuestran que la yuca produjo la mayor cantidad de almidón en comparación con la papa y el camote.

El rendimiento de la extracción de almidón también se ve influenciado, en gran medida, por el estado de madurez del tubérculo o raíz, pues según Zárate-Polanco et al. (2014) en el estudio realizado en clones promisorios de papa criolla, se encontró que algunos clones con mayor contenido de almidón no arrojaron un gran porcentaje de rendimiento debido a la madurez del tubérculo en el momento de la extracción. El rendimiento promedio de almidón nativo fue del 12,5% para los clones promisorios de papa criolla evaluados.

2.2.3 Vía seca

El método de extracción de almidón por vía seca es un método, que a diferencia del proceso por vía húmeda que utiliza agua en sus diferentes etapas, se basa en procedimientos mecánicos que minimizan el uso de líquidos, favoreciendo así la conservación de recursos hídricos y la reducción de residuos líquidos. Esta técnica implica el secado, molienda y tamizado del material vegetal para liberar y recolectar el almidón en forma de polvo. Este enfoque es adecuado para la producción a gran escala, donde la eficiencia y la sostenibilidad son factores clave, y resulta en un producto final que puede ser utilizado en diversas aplicaciones industriales y alimentarias.

Pérez et al. (2005) señala que el método seco en *Xanthosoma sagittifolium* y *Colocasia esculenta* inicia con la preparación de las muestras para extracción, los tubérculos limpios fueron pelados, pesados, cortados y molidos durante 2 minutos a alta velocidad en una licuadora con pequeñas cantidades de agua destilada. La homogeneización resultante se pasó por un tamiz de malla 80, repitiendo cuatro veces esta operación de molienda y tamizado. La suspensión resultante se pasó por tamices de 200 y 270 mallas y se centrifugó a 1500 r.p.m. por 20 minutos. Después el sedimento se lavó varias veces por suspensión en agua destilada y centrifugación hasta que pareciera estar libre de material no almidonado. El sedimento se secó en un horno a 45 °C.

Otra técnica por vía seca realizada en rizomas de *Canna indica* L., implicó limpiar los rizomas, luego se sumergieron en una solución de $K_2S_2O_5$, en una concentración al 0,5% (p/v) a 38° C durante 15 min. Luego, los rizomas se retiraron de la solución y se cortaron en rodajas para nuevamente ser sumergidos en solución $K_2S_2O_5$ al 0,8% (p/v) durante 15 min, para evitar la oxidación de las rodajas. Después, las rodajas se colocaron en bandejas y se secaron a 40 °C durante 45 horas en un horno. Finalmente, las rodajas secas se molieron finamente y se pasaron a través de tamices de diferentes medidas (malla 32, 42, 80, 115 y 400) (Andrade-Mahecha et al., 2012).

Cobana & Antezana (2007) llevaron a cabo el este método en yuca, por medio de dos técnicas. La primera técnica consistió en lavado y descascarillado del insumo, rallado, deshidratado, molido y tamizado. Mientras que la segunda técnica comenzó con un lavado y

descascarillado, rallado, pre-deshidratado, pre-molido, deshidratado, molido y tamizado. La etapa de rallado tuvo por objeto desmenuzar la pulpa y romper las paredes celulares para facilitar la liberación de los gránulos de almidón. El pre-deshidratado se realizó a 45 °C en los tres niveles de estudio de 20 %, 30 % y 45 % de humedad residual, con la finalidad de continuar la próxima etapa de pre-molienda con humedad intermedia y obtener una separación inicial de la fibra. La pre-molienda consistió en someter el producto húmedo a una fuerza de compresión para facilitar la separación inicial de la fibra y los gránulos de almidón, esta etapa se realizó durante 10 minutos. El deshidratado final se realizó a una temperatura de 60 °C hasta una humedad final de 12 %. El proceso de tamizado es a tres diferentes evoluciones y las cribas utilizadas fueron de 100, 90, 71 y 45 μm .

Por otro lado, el rendimiento de almidón obtenido en el proceso de extracción seca de yuca varía según las condiciones de pre-molienda, molienda y tamizado utilizadas (Cobana & Antezana, 2007). El rendimiento promedio de todos los productos finales del total de combinaciones de la segunda técnica presenta que el rendimiento máximo obtenido fue del 100% para una luz de malla de 71 μm , mientras que el rendimiento mínimo fue del 45% para una luz de malla de 100 μm .

Para los tubérculos, *Xanthosoma sagittifolium* y *Colocasia esculenta*, el rendimiento fue del 10-12% en peso seco. Esto significa que, por cada 100 g de tubérculos secos, se obtuvieron entre 10 y 12 g de almidón. Este rendimiento es similar al obtenido en otros estudios de extracción de almidón de tubérculos y raíces (Pérez et al., 2005).

2.2.4 Método por trituración y prensado

El método de extracción de almidón por trituración y prensado es una técnica que implica la combinación de procesos mecánicos, los cuales aprovecha para obtener almidón de materias primas vegetales. Este proceso, generalmente comienza con la trituración del material vegetal para desintegrar las células y liberar el almidón. Luego, se somete a un prensado, lo que facilita la separación del almidón de la fibra y otros componentes sólidos.

Esta técnica es descrita por distintos autores, los cuales trabajaron con diferente tubérculo o raíz, por lo cual el proceso en algún punto es diferente, sin embargo, la secuencia de pasos en la mayoría, es similar.

Silva et al. (2020) describe el proceso de extracción de almidón del inhambu (*Dioscorea trifida* L.), comenzando con la limpieza del tubérculo para separar impurezas, después estos se pelan y se trituran en un procesador de alimentos. La pulpa resultante se tamiza a través de mallas de 0,149 mm y 0,079 mm con el fin de eliminar las fibras y otros residuos. Así mismo, la pulpa suspendida se lava cuatro veces con agua y se purifica con alcohol absoluto para eliminar las impurezas. Luego, se filtra y se seca a 35 °C por 12 horas.

Por otro lado, el método de extracción del almidón de los granos andinos (amaranto, quinua y canihua), consistió en remojar los granos en una solución de NaOH al 0.25% (p/v) a 5°C durante 24 horas. Luego, se trituran los granos y se filtró la mezcla a través de tela y tamices de diferentes tamaños. La suspensión final se centrifugó a 2,500 r.p.m. por 15 minutos, y se decantó el sobrenadante, el almidón restante se resuspendió en agua pura y se centrifugó de nuevo hasta que la capa superior fuera transparente. Finalmente, el almidón se llevó a secado durante 48 horas a 40°C (Fuentes et al., 2019).

En cuanto al rendimiento obtenido en este método, (Silva et al. (2020) reporta que el rendimiento de almidón obtenido del inhambú fue del 22.76%, este alto rendimiento es un indicador de la eficacia del proceso de extracción y la abundancia de almidón en el inhambú. Por otro lado, el rendimiento de almidón del ñame chino, según el estudio, los rendimientos de almidón de las etapas de expansión y latencia fueron del 63.4% y 61.2%, respectivamente (Zou et al., 2020). Estos valores indican la eficiencia con la que se pudo aislar el almidón de los tubérculos de ñame chino en las diferentes etapas de crecimiento.

2.2.5 Centrifugación

Otro método para la extracción de almidón y en el cual se combinan procesos mecánicos con los tradicionales como húmedo, es la técnica con centrifugación, la cual consiste en centrifugar la mezcla de rizoma con agua u algún otro agente con el fin de acelerar su sedimentación.

Para la extracción de almidón en rizomas de makal (*Xanthosoma yucatanensis*), camote (*Ipomea batata*), yuca (*Manihot esculenta Crantz*) y sagú (*Marantha arundinacea*), se llevó a cabo primero el pelado y cortado de los insumos en cubos de 3 cm por cada lado y fueron remojados 30 minutos en una solución de bisulfito de sodio con una concentración de 1,500 ppm, en una relación 1:3 (p/v). Los cubos se molieron en un procesador de alimentos, para reducir el tamaño de partícula, de esta manera la masa resultante se mezcló con una solución de bisulfito de sodio con una concentración de 1,500 ppm de SO₂, en una relación 1:1 (v/v). La lechada de almidón se filtró en coladores de malla 80, para eliminar la fibra, y el filtrado se dejó sedimentar a 4 °C, durante 4 horas. Transcurrido este tiempo, se eliminó el sobrenadante y se realizaron tres lavados con agua destilada, centrifugando en el último lavado a 2,500 r.p.m., durante 12 minutos, con la finalidad de recuperar la mayor cantidad de almidón posible. Finalmente, se secó en una estufa de convección a 55 °C, durante 24 horas (Hernández-medina et al., 2008).

Otro estudio realizado por Altemimi (2018), implicó la obtención de almidón por medio de diferentes velocidades en centrifuga, en el cual primero se lavaron y pelaron 600 g de papas de piel amarilla y se cortaron en trozos pequeños. Se agregó agua destilada a las papas y se llevó a cabo el proceso de extracción mediante el uso de una centrífuga a diferentes velocidades (1000, 2000, 4000 r.p.m.) durante diferentes períodos de tiempo (5, 10, 15 minutos). Luego, las muestras centrifugadas se filtraron y se desechó el sobrenadante para obtener el almidón húmedo. El almidón húmedo se secó a temperatura ambiente durante 5 horas, se trituyó en un polvo fino y se almacenó en recipientes sellados para su uso posterior.

El aislamiento de almidón en de taro implicó el cortado de las raíces en rodajas y secadas al aire a una temperatura de 40°C (Aboubakar et al., 2008). Luego, se molieron y tamizaron para obtener la harina de este. Seguido, dicha harina fue puesta en solución de NaCl al 2% en un termoagitador por 5 horas a 40 °C. Después se filtró la mezcla a través de una malla 80 y se dejó reposar durante una noche. El almidón sedimentado se trató con NaOH 0,03 M y se centrifugó a 4,500 r.p.m. durante 15 minutos. Después se lavó dos veces con agua destilada y una con etanol para eliminar cualquier impureza. Finalmente, el almidón se secó a 30 °C y fue almacenado.

El rendimiento de almidón para este método, fue reportado por Zou et al. (2020) en el ñame chino, este se calculó mediante la relación de peso del almidón aislado al peso de la harina de utilizada en el proceso de extracción. Según este estudio, los rendimientos de almidón de las etapas de expansión y latencia fueron del 63.4% y 61.2%, respectivamente. Por otro lado, el rendimiento de almidón obtenido en la extracción de almidón de papa se midió en porcentaje y se determinó mediante el peso del almidón extraído en relación con el peso inicial de las papas utilizadas. Este tuvo una variación con respecto a las condiciones de procesamiento utilizadas. Se encontró que, las condiciones óptimas para la extracción fueron una velocidad de centrifugado de 3,000 r.p.m. y un tiempo de 15 minutos, lo que produjo el rendimiento más alto de almidón.

2.2.6 Método por solventes

La técnica para la extracción de almidón por medio de solventes es un método un poco más avanzado ya que implica la utilización de disolventes químicos para separar el almidón de la materia prima vegetal. Dicho proceso implica la selección de un solvente adecuado para disolver las estructuras no deseadas sin afectar la del almidón. Una vez que el solvente ha disuelto las impurezas, el almidón puede ser recuperado mediante técnicas de separación, como la filtración o la centrifugación. Este método permite una extracción más eficiente y selectiva, sin embargo, al utilizarlos, los riesgos ambientales y de salud son altos, por lo que requiere un manejo cuidadoso para minimizar estos riesgos.

Oladebeye et al. (2023) describe que la extracción del almidón del ñame silvestre (*Dioscorea villosa*) implica en primer lugar, lavar los tubérculos con agua destilada, pelarlos, cortarlos y triturarlos en licuadora; para después, con la suspensión resultante, mezclarla con una solución de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ al 4 % y filtrarlo a través de tela muselina. El filtrado se deja reposar durante 5 horas, suficientes para permitir que el almidón húmedo se sedimente en el fondo. Transcurrido este tiempo, se lava con agua destilada un par de veces hasta obtener una torta húmeda pura de almidón. Finalmente, se seca en papel de aluminio a 50°C durante 24 horas y se almacena a 4°C antes del análisis.

El proceso de extracción de almidón de los rizomas de *Cyperus alulatus* (Paramakrishnan et al., 2015) comenzó con la recolección de rizomas, estos se lavaron con agua destilada y luego

se cortaron en trozos pequeños y se pusieron a remojar en una solución de NaOH al 0.05% durante 24 horas a temperatura ambiente. Después de este tiempo se lavó el exceso de solución y se molió dicha mezcla para formar una suspensión para luego ser pasada a través de un tamiz para separar el almidón. Finalmente, el almidón sedimentado se recoge y se seca al aire libre.

Otro proceso de extracción que implicó la utilización de disolventes químicos fue para los almidones de taro (*Colocasia esculenta*) de tres cultivares plantados en diferentes estaciones descrito por Lu et al. (2008), este se llevó a cabo comenzando con el pelado, pesado y cortado de los tubérculos, para después ser molidos en una solución de NaOH al 0.1%, con el fin de facilitar su extracción, después la suspensión resultante se filtró a través de un tamiz de malla fina y se centrifugó para separar el almidón. El sedimento resultante de almidón se neutralizó con solución de HCl al 0.1 N, para finalmente ser lavado con agua y deshidratado con etanol para llevar a secado a 40 °C.

El rendimiento de almidón reportado en esta técnica fue el obtenido de los rizomas de *Cyperus alulatus*, el cual se calculó dividiendo el peso del polvo de almidón obtenido entre el peso inicial de los rizomas utilizados en la extracción, el cual resultó del 11.93%.

2.2.7 Método enzimático

Una de las técnicas, en la actualidad, más avanzadas para la extracción de almidón es el método enzimático, este se basa en la utilización de enzimas específica para descomponer las estructuras celulares de la materia prima utilizada, liberando de esta forma el almidón. Este proceso, se basa en la acción catalítica de enzimas como amilasas, celulasas o xilanasas, las cuales no afectan la estructura del almidón. Este método ha demostrado ser efectivo para mejorar el rendimiento de extracción de almidón y producir almidones de alta calidad (Narayana, 2002).

Esta técnica fue reportada por Hameed et al. (2020), en la cual su objetivo fue determinar una metodología optimizada, eficaz y eficiente para la recuperación de almidón de papa. El proceso inició con el lavado y secado de las papas frescas antes de ser cortadas y molidas para obtener una harina. Luego, esta harina, se transfirió a un matraz y se agregó la cantidad adecuada de agua para cada experimento. Se preparó la mezcla de enzima celulasa, la cual fue de 1 g de enzima en 10 mL de agua para así obtener una concentración de 0.1, lo mismo se hizo con las

demás concentraciones a utilizar, es decir, de la 0.2 a la 0.5. Para una concentración de 0,1 g/100 g de harina de papa, se mezcló 1 mL de solución de enzima preparada en 100 g de harina de papa, todo esto en el matraz mientras estaba en agitación constante durante cierto tiempo de contacto a manejar, que fue de 1 a 5 horas. Durante este tiempo, el pH se monitoreo a modo de mantenerlo siempre a un pH 5. La mezcla se calentó y se filtró antes de secar el almidón recuperado. El estudio utilizó la metodología de superficie de respuesta para optimizar los parámetros de extracción, incluyendo la concentración de enzimas, el tiempo de contacto y la dilución.

Además de la enzima celulasa, también pueden emplearse combinaciones de enzima como xilanas y celulasa en distintas concentraciones, como en el caso de la extracción de almidón en tubérculos de taro (*Colocasia esculenta* var. *antiquorum*), en el cual primero se llevó a cabo el lavado, pelado y cortado de los tubérculos, después se llevaron a molienda en licuadora durante 1 min y medio. La pulpa resultante se mezcló con agua destilada y se transfirió a un vaso de precipitados, en donde se realizó el tratamiento enzimático utilizando la combinación de celulasa y xilanas en diferentes concentraciones y tiempo de incubación siguiendo un diseño experimental, en el cual se plantearon distintos tratamientos con las variables de concentración de enzimas, tiempo de incubación y temperatura de incubación. De esta manera, la suspensión (Sit et al., 2015) se incubó a diferentes temperaturas en un termoagitador a 150 r.p.m. Después de cada tratamiento de incubación, la suspensión se filtró y se centrifugó a 3,000 r.p.m. durante 10 minutos. El sedimento de almidón resultante se lavó con agua destilada 2 veces y se llevó a secado a 45°C durante 24 horas y finalmente se almacenó

El rendimiento del almidón para este proceso, según lo reportado por Hameed et al. (2020), en la extracción enzimática de almidón de papa, fue del 89% bajo condiciones específicas, utilizando la metodología de superficie de respuesta para optimizar la extracción. Este rendimiento se pudo alcanzar al tomar en cuenta las variables de concentración de enzima, tiempo de contacto y la dilución en el proceso de extracción.

En el estudio realizado en tubérculos de taro, en donde las variables consistieron en concentración de combinación de enzimas (celulasa y xilanas), tiempo y temperatura de incubación, el mayor rendimiento de almidón (17.22 %) se obtuvo con concentraciones de celulasa y xilanas de 299.86 y 300 U/100 g de tubérculo, respectivamente, a una temperatura

de 35 °C y un tiempo de incubación de 2 h (Sit et al., 2015). Este proceso enzimático permitió obtener un rendimiento significativo de almidón, lo que indica la eficacia de la combinación de celulasa y xilanasas en la liberación y recuperación del almidón presente en los tubérculos de taro.

2.2.8 Método asistido por ultrasonido

La extracción de almidón asistida por ultrasonido es una técnica avanzada e innovadora que utiliza ondas ultrasónicas para facilitar la obtención de este polisacárido a partir de materias primas, como cereales y tubérculos. Este método se basa en la aplicación de ultrasonidos de alta frecuencia, que generan cavitación y micro agitación en el medio, lo que hace que se rompan las paredes celulares y liberen el almidón de manera eficiente (Wang et al., 2021).

La energía ultrasónica mejora la penetración del solvente y acelera la liberación de almidón, reduciendo el tiempo de extracción y aumentando el rendimiento. Además, este enfoque se ha evidenciado que tanto la extracción ultrasónica como la enzimática son capaces de reducir notablemente el tiempo de extracción, disminuir el consumo de energía y mejorar la tasa de extracción. Por estas razones, se consideran métodos ecológicos y eficientes para la extracción de almidón (Lin et al., 2020).

El proceso de extracción de almidón en *Radix puerariae* asistido por ultrasonido de alta intensidad descrito por Li et al. (2019) comenzó con el lavado y pelado del tubérculo, se cortó en rodajas de 1 cm de grosor, estas se trituraron en un molido de granos durante 1 min. Se realizaron experimentos de extracción en un procesador de ultrasonido de 25.48 kW/m² con una sonda de 50 mm de diámetro. Se extrajo una muestra de 50 g con 400 mL de agua destilada a distintos niveles de intensidad de ultrasonido, los cuales iban de 15.29 a 25.48 kW/m² y frecuencia baja de 20 kHz, así como intensidad de 300 W y frecuencia baja de 45 kHz. Después se tomaron muestras de cada extracto cada 5 minutos durante 30 minutos para determinar el contenido de almidón, para esto se utilizó un grupo de control que se extrajo con agitación magnética a 300 r.p.m. por 2 horas.

El método asistido por ultrasonido también puede ser combinado con el de la extracción enzimática, tal es el caso del estudio realizado por Wang et al. (2021), en donde se realizó la

extracción enzimática de almidón asistida por ultrasonido en Kiwi. Para este proceso se utilizó kiwi de la variedad Huayou el cual se procesó en una licuadora con agua fría para obtener únicamente la pulpa. Después se agregaron las enzimas pectinasa, celulasa y papaína; se ajustó el pH de extracción con NaOH al 2%. Se establecieron las condiciones adecuadas de ultrasonido para llevar a cabo la extracción, las cuales, en cuanto a potencia de ultrasonido se evaluaron niveles de 200 W y 300 W, temperatura de extracción de 35 °C, 40 °C, 45 °C, 50 °C y 55 °C mientras que el tiempo de ultrasonido se varió con intervalos de 30, 60, 120 y 150 min. Una vez concluido cada tratamiento de incubación de las enzimas con la pulpa, la mezcla se centrifugó a 11,520 r.p.m. durante 10 min, el precipitado fue disuelto en etanol al 85% con el fin de eliminar la glucosa contenida y nuevamente se centrifugó 2 veces por 10 min. Después, nuevamente se disolvió en agua para centrifugar una última vez; se descartó el sobrenadante y el precipitado se llevó a secar a 30°C. Finalmente se molió y tamizó con un tamiz de malla 100.

El método de extracción en Kiwi combina la acción de enzimas con ondas ultrasónicas para lograr una extracción eficiente en un tiempo más corto y con menos solventes y enzimas, para este método el rendimiento optimo fue de 4.25% para las condiciones de ultrasonido de potencia 300 W y a una temperatura de 52°C.

En el estudio realizado en *Radix Puerariae*, los autores no mencionan el rendimiento específico del almidón obtenido, sin embargo, destacan que este no se vio afectado por las condiciones de ultrasonido empleadas, es decir la intensidad y frecuencia del ultrasonido.

2.2. 9 Inteligencia artificial

De acuerdo a Boden & Pérez Parra (2017), "la inteligencia artificial (IA) tiene por objeto que los ordenadores hagan la misma clase de cosas que puede hacer la mente. La inteligencia no es una dimensión única, sino un espacio profusamente estructurado de capacidades diversas para procesar la información. Del mismo modo, la IA utiliza muchas técnicas diferentes para resolver una gran variedad de tareas".

De acuerdo con esta definición, se puede describir a la inteligencia artificial (IA) como las habilidades que poseen las máquinas para poder realizar las actividades que necesitan de la

parte humana, utilizando algoritmos, usando datos y aprender de ellos, con el fin de emplear esas herramientas y tomar decisiones, tal cual lo haría un ser humano.

La inteligencia artificial tiene varias ventajas, desde la que nos permite ahorrar tiempo en hacer ciertas actividades, hasta en la que dichas maquinas pueden llegar a analizar y almacenar una gran cantidad de información, contrario a lo que es capaz el ser humano. Debido a estas capacidades, los sistemas de inteligencia artificial son capaces de realizar múltiples tareas, muchas de las cuales eran exclusivas para la mente humana.

Asimismo, Boden y Parra (2017) mencionan que la IA se basa en dos objetivos principales, que son el uso tecnológico y científico. El primero se basa en hacer cosas útiles de la vida cotidiana, y el segundo se encarga de usar conceptos y modelos de IA con el fin de resolver cuestiones de la vida. En base a esto, se puede decir que la IA, tiene múltiples aplicaciones, sin embargo, la que interesa para fines de este trabajo de investigación es la de optimizar un proceso mediante técnicas que la empleen.

De acuerdo a Nath et al. (2024), el principal objetivo de la inteligencia artificial es la creación de una máquina que sea capaz de pensar como un ser humano y replicar sus comportamientos como el razonamiento, aprendizaje, predicción y planificación.

Asi mismo, las áreas de estudio de la inteligencia artificial abarcan algoritmos de búsqueda y evolución, gráficos de conocimiento, lenguaje natural, sistemas expertos, aprendizaje automático y profundo, entre otros. Por otra parte, los alimentos, productos de la práctica de agricultura en el sector alimentario, son una parte esencial para el desarrollo del ser humano. La inteligencia artificial ha jugado un papel muy importante en la economía nacional y mundial de las naciones en desarrollo. Por lo tanto, es crucial garantizar la seguridad de los productos del sector alimentario y su alta calidad mediante una distribución adecuada.

La aplicación de la inteligencia artificial en la agricultura y empresas alimentarias benefician en la entrega de productos de buena calidad, a tiempo y satisfacción de requisitos sociales, ya que de acuerdo a Misra et al., 2020, gracias a la inteligencia artificial se puede crear, en este sector, una gran cantidad de productos alimenticios rápidamente, lo que impulsará exponencialmente la economía de la empresa. Además, permite optimizar procesos, ya que, al

utilizar un sistema informático, la industria puede revisar y asegurar que se puedan mejorar las condiciones óptimas, como recolección de semillas, el seguimiento de los cultivos, el riego y el seguimiento de las temperaturas.

De esta manera, la inteligencia artificial puede ser aplicada en la extracción de almidón de distintas maneras con el fin de mejorar la eficiencia del método e incluso optimizar el proceso así como predecir el rendimiento máximo que puede alcanzar cada método en base a datos reales generados previamente. Además, la necesidad de considerar la importancia del ahorro de tiempo para aumentar la eficiencia económica puede ser beneficiada con el uso de la inteligencia artificial (Esmaily et al., 2024).

Existen diferentes modelos de inteligencia artificial que pueden ser aplicados en procesos de extracción de almidón, por ejemplo, regresión lineal, bosques aleatorios (Random forest), redes neuronales artificiales (RNA), algoritmos genéticos, máquinas de soporte vectorial (SVM), entre otros. En esta investigación, se aplicaron dos de ellas, las cuales fueron redes neuronales artificiales y bosques aleatorios.

Las redes neuronales artificiales básicamente se encargan de imitar la operación básica del cerebro, en donde, de acuerdo a Campos Wright y Trujillo Casañola (2021), se encarga, al igual que las neuronas del ser humano, llevar la información a través de estas y, basada en la estructura de los conectores neuronales, en estas, cada neurona se conecta entre sí a través de un coeficiente de ajuste.

El proceso de entrenamiento de una red neuronal artificial (RNA) implica en alimentar varias veces a la red con una serie de patrones de entrada y ajustar los pesos de las conexiones según las salidas obtenidas. (Campos Wright & Trujillo Casañola, 2021). Para ello, existen tres tipos de aprendizaje: supervisado, de refuerzo y no supervisado, en donde cada uno se utilizan diferentes algoritmos según la información disponible sobre los patrones de entrada. Cabe destacar, que en este artículo se menciona que las principales ventajas de las redes neuronales artificiales incluyen su capacidad de generalización, que permite respuestas adecuadas a entradas no vistas previamente; su naturaleza distribuida, que facilita la construcción de sistemas eficientes; su capacidad para aproximar funciones no lineales, resolviendo problemas complejos; y su adaptabilidad a cambios en el entorno.

Otra técnica aplicada en este trabajo, fue bosques aleatorios (Random Forest), la cual es una técnica que combina múltiples árboles de decisión, conocidos como clasificadores débiles, utilizando una colección de árboles no correlacionados y promediando sus resultados. En este algoritmo, cada árbol en el bosque depende de los valores de un vector aleatorio de la muestra de manera independiente y con la misma distribución que los otros árboles. A medida que aumenta el número de árboles, el error de generalización conlleva a un límite. Este error de generalización siempre depende de la fortaleza de los árboles individuales y la correlación que hay entre ellos.

Básicamente, este método se basa en un conjunto de árboles de decisión, donde una muestra pasa por una serie de pruebas binarias en cada nodo (divisiones), hasta llegar a una hoja que tiene la respuesta. Esta técnica se utiliza para dividir un problema complejo en varios problemas simples.

El modelo de redes neuronales artificiales (RNA), de acuerdo a Chandra et Mohan al. (2016) son una herramienta específica para la modelación predictiva y optimización de diversos datos experimentales, y debido a esto, se utilizan para examinar el efecto que generan en la optimización y el análisis estadístico de datos de investigación.

Kalmuka et al. (2023) emplearon el modelo de red neuronal artificial (RNA) y la metodología de superficie de respuesta (MSR) para mejorar la extracción de almidón de los cormos de ñame pata de elefante (*Amorphophallus paeoniifolius*). En este estudio el modelo MSR demostró ser más preciso que la RNA en la predicción del rendimiento de almidón.

Por otro lado, Kutyauro et al. (2023) utilizaron redes neuronales para predecir los cultivos agrícolas, pues la solución a los desafíos de la agricultura actualmente, es el uso de la inteligencia artificial, específicamente el aprendizaje automático y el aprendizaje profundo, pues se tiene como referencia que, empleando estos algoritmos, los productos agrícolas se pueden seleccionar y clasificar en función de factores relacionados con el tipo de suelo.

Capítulo 3. Metodología

Esta investigación es de tipo experimental, ya que se pretende manipular y controlar una o más variables independientes para observar los efectos que tienen sobre una variable dependiente.

En este capítulo se describen detalladamente las etapas y métodos a seguir para establecer una metodología general de la extracción de almidón de *Canna indica l.* a través de distintas variables utilizadas en tres técnicas distintas, así como la implementación de inteligencia artificial en este proceso para establecer en cual se obtiene un mayor rendimiento. La figura 7 muestra la estructura de cada una de las etapas propuestas:

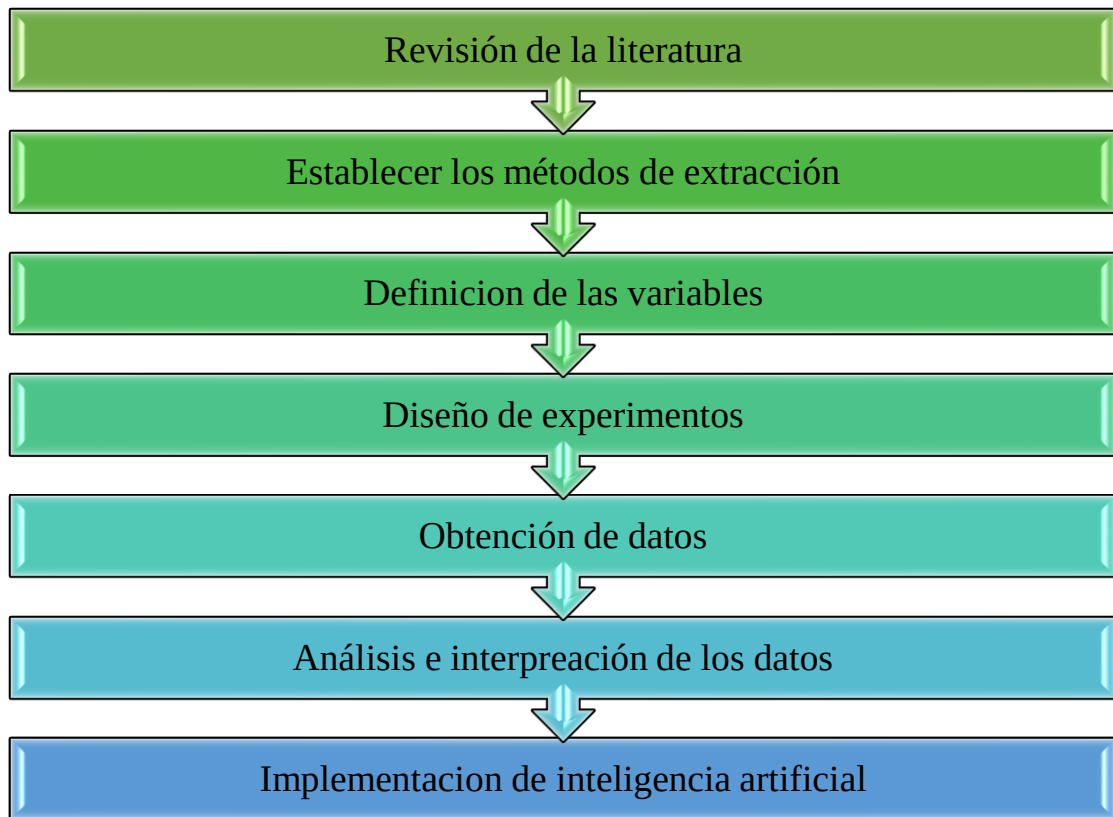


Figura 7. Metodología propuesta para la implementación del proceso de extracción de almidón de rizoma de *Canna indica l.*

3.1 Revisión de la literatura

Basada en la información recabada anteriormente, en torno a los procesos de obtención del almidón obtenido de diferentes vegetales, tuberculos y raíces, enfocando principalmente en el método húmedo, seco y enzimático.

Se seleccionaron las técnicas y variables sobre las cuales se llevaría a cabo la extracción de almidón del rizoma.

Para el método por vía seca, se basó en la técnica descrita por Andrade-Mahecha et al., (2012), la cual se realizó en rizomas de *Canna indica* L. Esta consistió en limpiar los rizomas, para luego sumergirlos en una solución de $K_2S_2O_5$, en una concentración al 0,5% (p/v) a 38° C durante 15 min. Luego, los rizomas fueron retirados de la solución y se cortaron en rodajas para ser sumergidos, de nuevo, en solución $K_2S_2O_5$ al 0,8% (p/v) durante 15 min. Después, las rodajas se colocaron en bandejas y se secaron a 40 °C durante 45 horas en un horno. Finalmente, se molieron y se pasaron a través de tamices de diferentes medidas (malla 32, 42, 80, 115 y 400).

En la extracción por vía húmeda se tomó de base, la combinación de las técnicas empleadas por Fonseca-López et al. (2019), en donde realizaron un estudio con el rizoma de *Canna indica* donde compararon dos métodos por vía húmeda uno por licuado y otro por rallado. El método de extracción por licuado consistió en cortar los rizomas en trozos pequeños y luego licuarlos con agua destilada. Posteriormente, se dejó en suspensión por 3 horas, se retiró la fibra y el almidón sedimentado se filtró en una malla. Luego, el almidón se llevó a secado a 60 °C. El método de extracción por rallado consistió en rallar los rizomas y luego depositarlos en vasos de precipitado con agua destilada. Esta suspensión se dejó reposar por 3 horas, para después retirar la fibra y el almidón sedimentado se filtró. Se hicieron tres lavados con agua destilada y se dejó secar a temperatura ambiente por 48 horas.

Finalmente, para la extracción enzimática, se tomó como referencia la extracción de almidón en tuberculos de taro (*Colocasia esculenta* var. *antiquorum*), descrita por Sit et al., (2015) en el cual, después de limpiar los tuberculos, se llevaron a molienda durante 1 min y medio, el producto resultante se mezcló con agua destilada y se transfirió a un vaso de precipitados, en donde se realizó el tratamiento enzimático utilizando la combinación de

celulasa y xilanasas en diferentes concentraciones y tiempo, en donde se plantearon distintos tratamientos con las variables de concentración de enzimas, tiempo de incubación y temperatura de incubación. De esta manera, la suspensión se incubó a diferentes temperaturas en un termoagitador a 150 r.p.m. Después de cada tratamiento de incubación, la suspensión se filtró y se centrifugó a 3,000 r.p.m. durante 10 minutos. El sedimento de almidón resultante se lavó con agua destilada 2 veces y se llevó a secado a 45°C durante 24 horas y finalmente se almacenó.

3.2 Establecer los métodos de extracción

Una vez revisada la literatura acerca de la extracción de almidón y sus variables, se seleccionaron tres métodos de extracción para llevar a cabo durante esta investigación: método vía húmeda, método vía seca y método vía enzimática.

Vía seca

Este método se basa en la obtención de almidón a partir del secado material vegetal que es sometido a operaciones pequeñas que se llevan a cabo para la obtención del producto final (Cobana & Antezana, 2007). El proceso de este, generalmente comienza con la molienda de la materia prima para poder obtener un polvo fino. Luego, se realiza un tamizado para separar las partículas más finas, ricas en almidón, del resto de los componentes de la planta. Finalmente, se lleva a cabo un proceso de secado para obtener el almidón deseado.

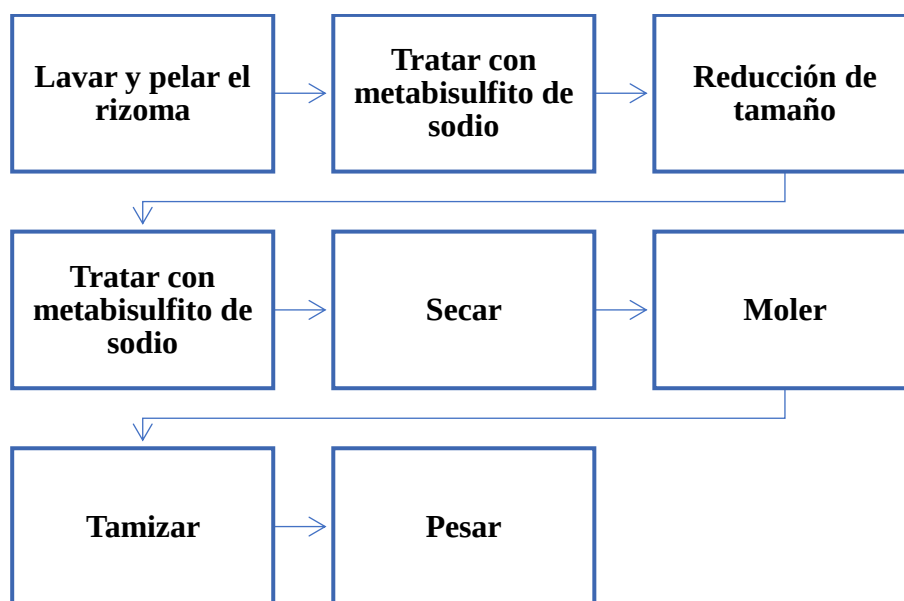


Figura 8. Metodología propuesta para el método de extracción por vía seca (Fuente: propia).

Vía Húmeda

Este método implica la separación de los componentes solubles e insolubles en agua. Por lo general, se utilizan técnicas de lavado y sedimentación para separar el almidón de otros componentes. De acuerdo a Cobana (2007) este proceso consiste en descomponer las paredes celulares para liberar los gránulos de almidón mediante un proceso de rallado, seguido de la adición de agua y una filtración que separa las partículas de almidón suspendidas en el líquido de las partículas más grandes. Posteriormente, se elimina el agua, se lava el material y finalmente se somete el almidón purificado a un proceso de secado.

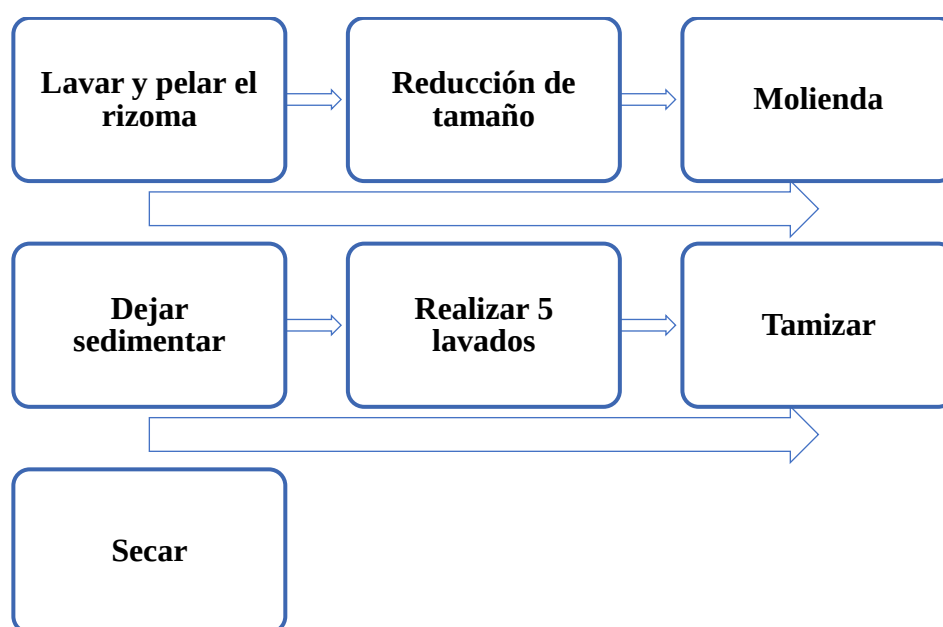


Figura 9. Metodología propuesta para el método de extracción por vía húmeda (Fuente: propia).

Vía enzimática

Este método consiste en utilizar enzimas para descomponer las estructuras celulares y liberar los gránulos de almidón. De acuerdo a Hameed et al. (2020), esta técnica surgió como una alternativa energéticamente eficiente para extraer almidón de los cultivos, requiriendo menos molienda y menos energía en comparación con otras técnicas de extracción de almidón.

El proceso empleado por Hameed et al. (2020) implica la mezcla de la materia prima con una solución enzimática de celulasa y la incubación en condiciones específicas de pH y temperatura. Para esta incubación, la concentración de la enzima celulasa, el tiempo de contacto

de la enzima con el material vegetal así como la temperatura son las variables principales que se tomaron en cuenta para hallar las condiciones óptimas de extracción. Finalmente, después de la incubación, se lleva a cabo una serie de pasos de separación y purificación para obtener el almidón deseado.

Otro estudio realizado por Sit et al. (2015), se realizó empleando combinaciones de enzima celulasa y xilanasa en distintas concentraciones, variando el tiempo y temperatura de contacto, para después llevar a cabo la separación del almidón por medio de centrifugación y finalmente llevar a secado.

De esta manera, tomando en cuenta las metodologías descritas anteriormente, se establecieron los pasos a seguir para esta extracción.

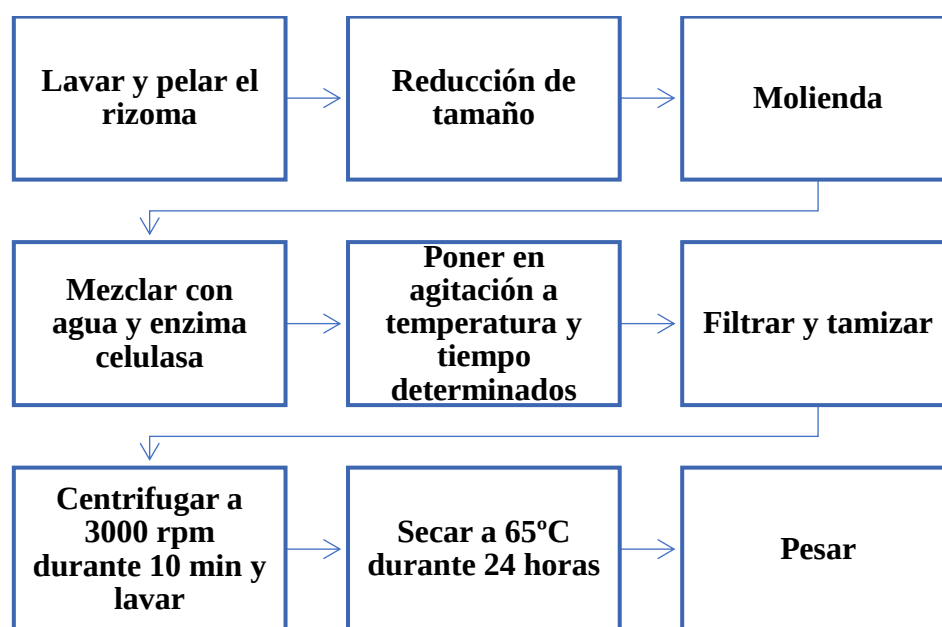


Figura 10. Metodología propuesta para el método de extracción por vía enzimática (Fuente: propia).

3.3 Definición de las variables

Para cada método se identificaron las variables de control, las cuales servirán para garantizar la comparabilidad entre los tres métodos de extracción. La cantidad de rizoma a utilizar para cada prueba será de 250 g. Las variables, son distintas para cada técnica, a continuación, se presentan:

Vía seca:

- Concentración de metabisulfito de sodio.
- Temperatura de contacto.
- Tiempo de contacto.
- Temperatura de secado.
- Tiempo de secado.

Tabla 4. Valores de referencia a considerar en cada variable del método seco.

Concentración de Metabisulfito de Sodio (1)	0.5, 0.7, 0.9
Temperatura de contacto (°C)	38, 40, 50
Tiempo de contacto (min)	15, 25, 35
Concentración de Metabisulfito de sodio (2)	0.8, 0.9, 1.0
Tiempo de contacto (min)	15, 25, 35
Temperatura de secado (°C)	40, 50, 60
Tiempo de secado (horas)	45, 40, 35

Vía Húmeda:

- Tiempo de sedimentación.
- Temperatura de secado.
- Tiempo de secado.

Tabla 5. Valores de referencia a considerar en cada variable del método húmedo.

Tiempo de sedimentación (horas)	3.0, 3.5, 4.0
Temperatura de secado (°C)	65, 60, 55
Tiempo de secado (horas)	3, 4, 5

Vía enzimática:

- Concentración de enzima celulasa.
- Tiempo de contacto.
- Temperatura de contacto.

Tabla 6. Valores de referencia a considerar en cada variable del método enzimático.

Concentración de la enzima (g/g)	0.2, 0.4, 0.6
Tiempo de incubación (horas)	2, 4, 6
Temperatura de incubación (°C)	45, 55, 65

3.4 Diseño de experimentos

Se establece un diseño para cada uno de los tres métodos de extracción seleccionados: vía húmeda, vía seca y vía enzimática. Dentro de los cuales, se evalúan todas las variables involucradas en el proceso. A continuación, se presentan las pruebas para cada método de extracción a realizar:

Tabla 7. Pruebas para el método de extracción en *Canna indica* l. por vía seca.

Tratamiento	Conc Metabisulfito de Sodio (1)	Temp de contacto (°C)	Tiempo de contacto (min)	Conc Metabisulfito de sodio (2)	Tiempo de contacto (min)	Temp de secado (°C)	Tiempo de secado (horas)
1	0.5	38	15	0.8	15	40	45
2	0.5	40	25	0.9	25	50	40
3	0.5	50	35	1	35	60	35
4	0.7	38	15	0.8	15	40	45
5	0.7	40	25	0.9	25	50	40
6	0.7	50	35	1	35	60	35
7	0.9	38	15	0.8	15	40	45
8	0.9	40	25	0.9	25	50	40
9	0.9	50	35	1	35	60	35
10	0.5	38	15	0.8	15	40	45
11	0.7	38	25	0.9	25	50	40
12	0.9	38	35	1	35	60	35
13	0.5	40	15	0.8	15	40	45
14	0.7	40	25	0.9	25	50	40
15	0.9	40	35	1	35	60	35
16	0.5	50	15	0.8	15	40	45
17	0.7	50	25	0.9	25	50	40
18	0.9	50	35	1	35	60	35
19	0.6	39	15	0.9	25	50	40
20	0.7	40	15	1	35	60	35
21	0.5	38	25	0.8	15	40	45
22	0.7	40	25	1	35	60	35
23	0.5	38	35	0.8	15	40	45
24	0.6	39	35	0.9	25	50	40
25	0.7	40	25	0.8	25	50	40
26	0.9	50	35	0.8	35	60	35

27	0.5	38	15	0.9	15	40	45
28	0.9	50	35	0.9	35	60	35
29	0.5	38	15	1	15	40	45
30	0.7	40	25	1	25	50	40
31	0.7	40	25	0.9	15	50	40
32	0.9	50	35	1	15	60	35
33	0.5	38	15	0.8	25	40	45
34	0.9	50	35	1	25	60	35
35	0.5	38	15	0.8	35	40	45
36	0.7	40	25	0.9	35	50	40
37	0.7	40	25	0.9	25	40	40
38	0.9	50	35	1	35	40	35
39	0.5	38	15	0.8	15	50	45
40	0.9	50	35	1	35	50	35
41	0.5	38	15	0.8	15	60	45
42	0.7	40	25	0.9	25	60	40
43	0.7	40	25	0.9	25	50	45
44	0.9	50	35	1	35	60	45
45	0.5	38	15	0.8	15	40	40
46	0.9	50	35	1	35	60	40
47	0.5	38	15	0.8	15	40	35
48	0.7	40	25	0.9	25	50	35

Para la extracción de almidón en rizoma de *Canna indica* L. se consideraron 5 variables que fueron concentración de metabisulfito de sodio, temperatura de contacto (entre el rizoma y el reactivo), tiempo de contacto así como temperatura y tiempo de secado después de obtener el almidón, y los valores en cada uno se variaron a modo de crear una relación entre ellas tal como se observa en la tabla 7.

Tabla 8. Pruebas para el método de extracción en *Canna indica* L. por vía húmeda.

Tratamiento	Tiempo de sedimentación (horas)	Temperatura de secado (°C)	Tiempo de secado (horas)
1	3	65	3
2	3	60	4
3	3	55	5
4	3.5	65	3
5	3.5	60	4
6	3.5	55	5

7	4	65	3
8	4	60	4
9	4	55	5
10	3.5	65	4
11	4	65	5
12	3	60	3
13	4	60	5
14	3	55	3
15	3.5	55	4
16	3.5	60	3
17	4	55	3
18	3	65	4
19	4	55	4
20	3	65	5
21	3.5	60	5

Las variables a considerar en el método de extracción húmeda fueron solo tres: tiempo de sedimentación, temperatura y tiempo de secado. En la tabla 8, se muestran los valores que se establecieron para cada variable y en cada tratamiento.

Tabla 9. Pruebas para el método de extracción en *Canna indica* l. por vía enzimática.

Tratamiento	Tiempo de incubación (horas)	Temperatura de incubación (°C)	Concentración de la enzima (g/g)
1	2	45	0.2
2	2	55	0.4
3	2	65	0.6
4	4	45	0.2
5	4	55	0.4
6	4	65	0.6
7	6	45	0.2
8	6	55	0.4
9	6	65	0.6
10	4	45	0.4
11	6	45	0.6
12	2	55	0.2
13	6	55	0.6
14	2	65	0.2
15	4	65	0.4
16	4	55	0.2

17	6	65	0.2
18	2	45	0.4
19	6	65	0.4
20	2	45	0.6
21	4	55	0.6

De la misma forma, se estableció el diseño experimental para la extracción enzimática, tomando en cuenta las variables de tiempo de incubación (enzima-rizoma), temperatura de esta y temperatura de secado, después de obtener la muestra, es decir, el almidón.

3.5 Obtención de datos

Una vez establecido el diseño de cada uno de los métodos de extracción, se llevó a cabo cada una de las técnicas a nivel laboratorio. Lo cual permitió obtener los datos necesarios para evaluar cada método. A través de dichas pruebas, se buscó determinar las condiciones para la extracción del rizoma de *Canna indica* L., considerando variables como el tiempo, la temperatura, la concentración de enzima y los reactivos utilizados.

Los rizomas de *Canna indica* L. fueron recolectados en una finca ubicada en la ranchería espaldilla de la zona de Misantla, con coordenadas 19°58'17.0"N+96°51'38.3"W.

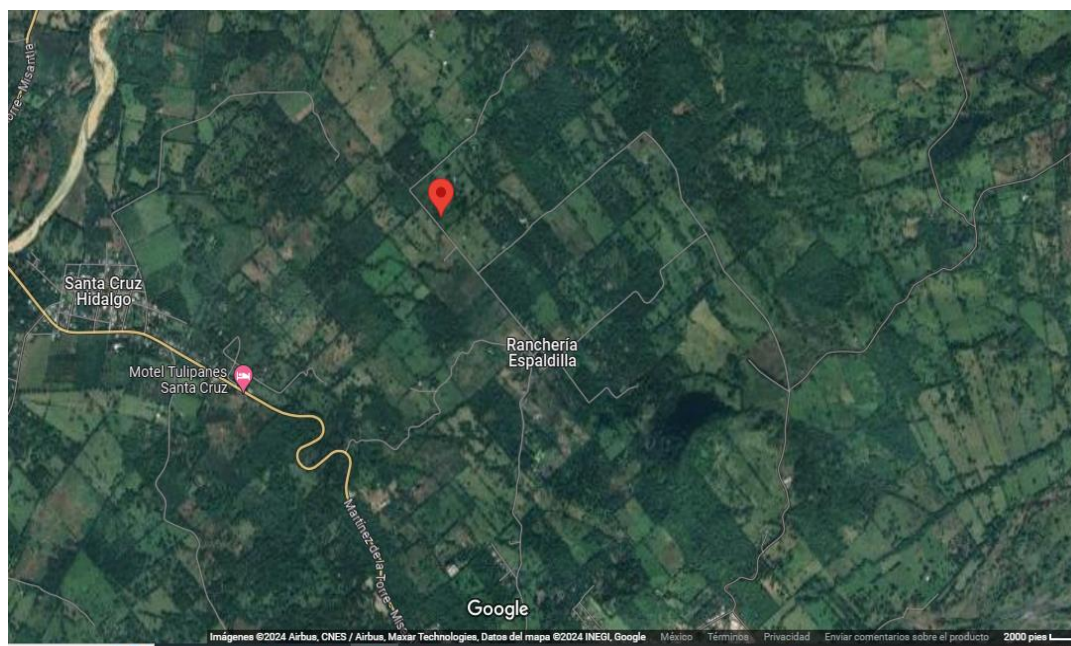


Figura 11. Ubicación de la finca.

- *Preparación del material vegetal*

Los rizomas se lavaron con abundante y pelaron para eliminar el exceso de tierra y componentes no deseados. Posteriormente se pesaron 250 g para cada experimento a realizar.



Figura 12. Rizoma de *Canna indica* l. recién recolectado.



Figura 13. Rizoma de *Canna indica* l. en proceso de lavado y limpieza.

Extracción por método seco

- *Primer tratamiento con metabisulfito de sodio*

Se realizó la preparación de la solución de metabisulfito de sodio, de acuerdo a las concentraciones manejadas en la tabla 7, para utilizarla en el tratamiento con los rizomas

previamente lavados, de la misma forma, se manejaron las temperaturas y tiempo de contacto indicadas por lo que fueron colocadas en un termoagitador.



Figura 12. Preparación del primer tratamiento de metabisulfito de sodio con rizomas de *Canna indica* l.

- *Reducción de tamaño.*

Los rizomas previamente tratados se cortaron en rodajas para realizar el segundo tratamiento con metabisulfito de sodio.



Figura 13. Reducción de tamaño de rizoma de *Canna indica* l.

- *Preparación del segundo tratamiento con metabisulfito de sodio*

Se preparó la solución de metabisulfito de sodio, de acuerdo a la tabla 7. Para ello se manejaron los tiempos indicados en la misma tabla y se colocaron en un agitador.



Figura 14. Segundo tratamiento de rizoma de *Canna indica l.* en rodajas con metabisulfito de sodio.

- *Secado de rodajas*

Las rodajas se retiraron de la solución de metabisulfito de sodio y se llevaron a secado a las temperaturas y tiempo correspondientes (tabla 7).



Figura 15. Rodajas de rizoma de *Canna indica l.* en la estufa de secado.



Figura 16. Rodajas de rizoma de *Canna indica* l. en proceso de secado a diferentes tiempos y temperaturas.



Figura 17. Rizoma de *Canna indica* l. después del proceso de secado.

- *Molienda del rizoma*

Después de retirar las rodajas del rizoma de *Canna indica* L. de la estufa de secado, se pasaron por un molino de granos hasta obtener un polvo fino.



Figura 18. Molienda del rizoma de *Canna indica* L. seco.

- *Tamizado*

El polvo fino resultante se separó de las partículas indeseables para obtener el almidón, con ayuda de tamices industriales de mallas 145, 200, 300 y 400.



Figura 19. Tamizado del rizoma de *Canna indica* L. molido.

- *Pesado del almidón*

Por último, el almidón obtenido del rizoma de *Canna indica* L. se pesó y se almacenó.

Extracción por método húmedo

- *Reducción de tamaño*

Los rizomas limpios se pesaron (250 g) y se cortaron en trozos con el fin de facilitar su molienda.



Figura 20. Rizoma de *Canna indica* L cortado en trozos.



Figura 21. Molienda del rizoma de *Canna indica* L.

- *Sedimentación*

Al rizoma molido se le añaden 500 mL de agua y se deja reposar de acuerdo a las horas indicadas en la tabla 8, para que el almidón se sedimente y se separe del resto de la mezcla.



Figura 22. Proceso de sedimentación de almidón del rizoma de *Canna indica* l.

- *Lavados*

Transcurridas las 4 horas de sedimentación, se procede a realizar entre 4 a 5 lavados al almidón sedimentado, con el fin de separarlo de la fibra del rizoma y demás sustancias indeseables. Después de los lavados, se obtiene el almidón sedimentado, en su mayoría, limpios, el cual se deja sedimentar con un poco de agua.

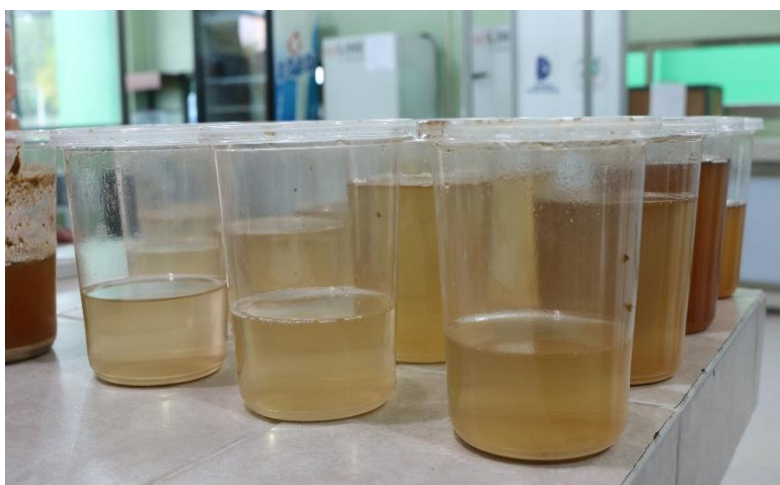


Figura 23. Proceso de lavado de almidón del rizoma de *Canna indica* l.



Figura 24. Almidón de rizoma de *Canna indica* l. sedimentado.

- *Tamizado*

La lechada del almidón limpio y sedimentado fue pasan a través de tamices de malla 145, 200, 300 y 400, añadiendo a su vez una cantidad pequeña de agua. Esto con el fin de obtener un almidón más purificado. Después se deja sedimentar durante 10 min.



Figura 25. Proceso de tamizado de la lechada de almidón. De rizoma de *Canna indica* l. sedimentado.



Figura 26. Almidón del rizoma de *Canna indica* L. sedimentado.

- *Secado*

Tanto el tiempo como la temperatura de secado se llevaron a cabo de acuerdo a la tabla 8. Finalmente, el almidón fue almacenado.

Extracción por método enzimático

La extracción de almidón por método enzimático se llevó a cabo utilizando la enzima celulasa, siguiendo los parámetros planteados de acuerdo a la tabla 9.

- *Reducción de tamaño*

Se pesaron 250 g de rizoma para llevar cabo cada experimento, se cortaron en trozos para facilitar su molienda.



Figura 27. Reducción de tamaño del rizoma de *Canna indica* L.

- *Molienda*

Los rizomas cortados se molieron perfectamente en una licuadora industrial adicionando 50 mL de agua. El rizoma molido se depositó en vasos de precipitados de 1,000 mL.



Figura 28. Rizoma de *Canna indica* l. molido.

- *Preparación de la enzima y mezclado*

Se prepararon tres concentraciones de enzima, se diluyeron 2 mL de enzima celulasa en 20 mL de agua destilada para obtener una concentración al 0.2, el mismo procedimiento se realizó para obtener una concentración 0.4 y 0.6.

A los 250 g de rizoma molido se añadieron 250 mL de agua para obtener una relación 1:1, y se añadieron 2.5 mL de la enzima preparada.



Figura 29. Preparación de la enzima celulasa y mezcla con el rizoma de *Canna indica* l. molido.

- *Incubación*

La preparación se colocó a un tiempo y temperaturas de incubación, de acuerdo a los valores de la tabla 8. Se mantuvo en agitación constante y se monitoreo la temperatura.



Figura 30. Incubación de la enzima con el rizoma de *Canna indica* l.

- *Filtración y tamizado*

Posteriormente, la preparación se filtra en una malla de muselina para separar el exceso de fibra generado. Después, la lechada de almidón se pasa por tamiz de malla 200 con el fin de retirar la máxima cantidad que se pueda de fibra restante.



Figura 31. Rizoma filtrado a través de una malla de muselina

- *Centrifugación y lavados*

La lechada resultante se centrifuga a 3,000 r.p.m. durante 10 min, después se descarta el líquido sobrenadante y el precipitado se lava 2 veces con agua hasta obtener el almidón limpio.



Figura 32. Centrifugación del almidón de rizoma de *Canna indica* L.



Figura 33. Almidón sedimentado después del lavado.

- *Secado*

Finalmente, el almidón se lleva a secado en estufa a 65°C durante 24 horas para después pesarlo y almacenarlo.

3.6 Análisis e interpretación de los datos

Los datos obtenidos se analizaron aplicando técnicas estadísticas para comparar los resultados de los tres métodos de extracción. Después de esto se interpretó el análisis estadístico para evaluar la eficacia de cada método de extracción de almidón del rizoma de *Canna indica* L. de acuerdo al rendimiento obtenido en cada uno.

3.7 Implementación de inteligencia artificial

Una vez establecido el método de extracción por medio del análisis estadístico, se llevará a cabo la comparación de estos con la implementación de inteligencia artificial mediante técnicas redes neuronales y bosques aleatorios (Random forest) en donde se predijo el rendimiento para cada método y así determinar cuál es el más idóneo para la extracción.

Capítulo 4. Resultados

Los resultados obtenidos en la extracción de almidón a partir del rizoma de *Canna indica* L. utilizando tres métodos distintos: vía seca, vía húmeda y vía enzimática consistieron en determinar las condiciones en las que el rendimiento de almidón fuera mayor. En el método seco, las variables incluyeron la concentración de metabisulfito, la temperatura y el tiempo de contacto, así como la temperatura y el tiempo de secado. Para el método húmedo, se experimentó con variables como el tiempo de sedimentación, la temperatura de secado y el tiempo de secado. En cuanto al método enzimático se manejaron variables de concentración de enzima celulasa, tiempo y temperatura de incubación. Los resultados obtenidos revelan las condiciones específicas en las que cada método alcanza un rendimiento superior, proporcionando una valiosa base para la determinación de procesos de extracción de almidón en *Canna indica* L.

4.1 Extracción de almidón en rizoma de *Canna indica* L. por método seco

Una vez realizados los 48 tratamientos de extracción seca, se calculó el rendimiento mediante la relación del almidón obtenido entre la cantidad de materia prima inicialmente utilizada, expresado en términos de porcentaje.



Figura 34. Almidón del rizoma de *Canna indica* L. obtenido por método seco.

Los resultados obtenidos en estas pruebas fueron los siguientes:

Tabla 10. Resultados obtenidos en la extracción de almidón de rizoma de *Canna indica* L. mediante método seco.

Tratamiento	Conc Metabisulfito de Sodio (1)	Temp de contacto (°C)	Tiempo de contacto (min)	Conc Metabisulfito de sodio (2)	Tiempo de contacto (min)	Temp de secado (°C)	Tiempo de secado (horas)	Almidón obtenido (g)	Rendimiento (%)
1	0.5	38	15	0.8	15	40	45	4.8	1.92
2	0.5	40	25	0.9	25	50	40	2	0.8
3	0.5	50	35	1	35	60	35	1.1	0.44
4	0.7	38	15	0.8	15	40	45	2.8	1.12
5	0.7	40	25	0.9	25	50	40	1	0.4
6	0.7	50	35	1	35	60	35	1.3	0.52
7	0.9	38	15	0.8	15	40	45	1.1	0.44
8	0.9	40	25	0.9	25	50	40	2	0.8
9	0.9	50	35	1	35	60	35	1.2	0.48
10	0.5	38	15	0.8	15	40	45	1	0.4
11	0.7	38	25	0.9	25	50	40	2.95	1.18
12	0.9	38	35	1	35	60	35	2.2	0.88
13	0.5	40	15	0.8	15	40	45	2	0.8
14	0.7	40	25	0.9	25	50	40	2.92	1.17
15	0.9	40	35	1	35	60	35	2.15	0.86
16	0.5	50	15	0.8	15	40	45	4	1.6
17	0.7	50	25	0.9	25	50	40	2.97	1.19
18	0.9	50	35	1	35	60	35	2.22	0.89
19	0.6	39	15	0.9	25	50	40	3	1.2
20	0.7	40	15	1	35	60	35	2.12	0.85
21	0.5	38	25	0.8	15	40	45	3.65	1.46
22	0.7	40	25	1	35	60	35	2.2	0.88
23	0.5	38	35	0.8	15	40	45	3.67	1.47
24	0.6	39	35	0.9	25	50	40	2.92	1.17
25	0.7	40	25	0.8	25	50	40	2.95	1.18
26	0.9	50	35	0.8	35	60	35	2.2	0.88
27	0.5	38	15	0.9	15	40	45	3.7	1.48
28	0.9	50	35	0.9	35	60	35	2.23	0.89
29	0.5	38	15	1	15	40	45	3.62	1.45
30	0.7	40	25	1	25	50	40	2.95	1.18
31	0.7	40	25	0.9	15	50	40	2.98	1.19

32	0.9	50	35	1	15	60	35	2.2	0.88
33	0.5	38	15	0.8	25	40	45	3.6	1.44
34	0.9	50	35	1	25	60	35	2.1	0.84
35	0.5	38	15	0.8	35	40	45	3.62	1.45
36	0.7	40	25	0.9	35	50	40	3.02	1.21
37	0.7	40	25	0.9	25	40	40	2.97	1.19
38	0.9	50	35	1	35	40	35	2.2	0.88
39	0.5	38	15	0.8	15	50	45	3.72	1.49
40	0.9	50	35	1	35	50	35	2.27	0.91
41	0.5	38	15	0.8	15	60	45	3.52	1.41
42	0.7	40	25	0.9	25	60	40	3.07	1.23
43	0.7	40	25	0.9	25	50	45	3.77	1.51
44	0.9	50	35	1	35	60	45	3.72	1.49
45	0.5	38	15	0.8	15	40	40	3.05	1.22
46	0.9	50	35	1	35	60	40	2.95	1.18
47	0.5	38	15	0.8	15	40	35	2.2	0.88
48	0.7	40	25	0.9	25	50	35	2.22	0.89

Se realizaron un total de 48 experimentos de extracción de almidón en rizoma de *Canna indica* L. los cuales reflejan una compleja interacción entre las variables manejadas. La concentración de metabisulfito de sodio, tanto en el tratamiento 1 como en el tratamiento 2, mostró una influencia significativa en el rendimiento del almidón. El metabisulfito de sodio actúa como un agente de preservación, ya que evita la degradación del rizoma y mantiene su integridad estructural.

El tiempo de contacto y la temperatura de contacto también influyeron en el rendimiento obtenido, ya que un mayor tiempo de contacto dio lugar a una interacción más larga entre el rizoma y el metabisulfito de sodio, lo que ayudó a que el almidón se liberará más fácilmente. Sin embargo, tiempos más prolongados con temperaturas un poco más altas pudieron influir y causar una degradación del almidón causando así una disminución en el rendimiento.

Por otra parte, la temperatura y tiempo de secado, fue una etapa importante para poder eliminar el exceso de humedad sin alterar la estructura del almidón resultante. Las temperaturas más altas así como los tiempos de secado prolongados disminuyeron el rendimiento debido a la posible formación de una capa dura que dificultó la liberación del almidón.

Como resultado, al analizar la relación del rendimiento con las variables manejadas, se identificaron condiciones que pueden maximizar la eficiencia de la extracción de almidón, los cuales se detallan más adelante.

4.2 Extracción de almidón en rizoma de *Canna indica* l. por método húmedo

Los resultados se obtuvieron a partir de los 21 experimentos que se llevaron a cabo por el método húmedo con distintas combinaciones de las variables de tiempo de sedimentación, temperatura y tiempo de secado. El rendimiento del almidón obtenido se calculó y se expresó en términos de porcentaje.

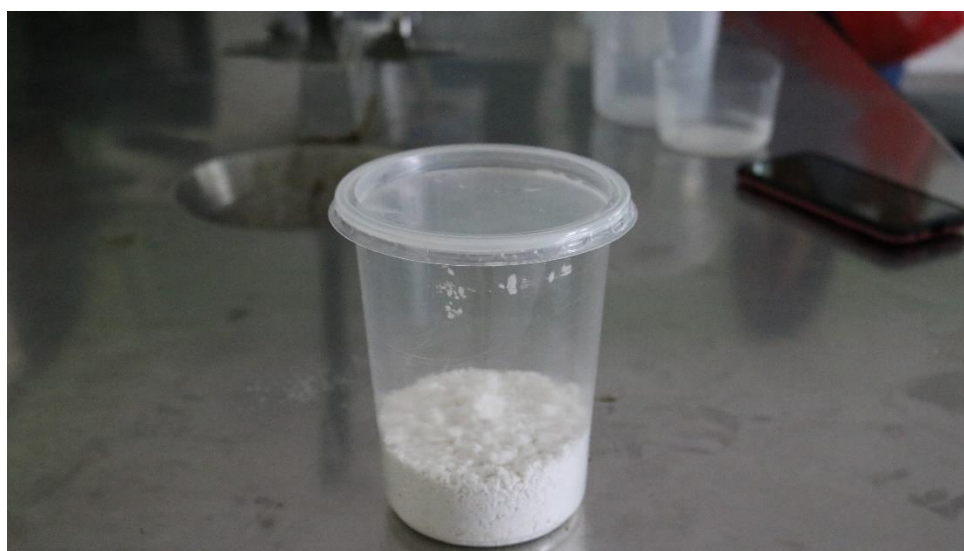


Figura 35. Almidón del rizoma de *Canna indica* l. obtenido por método húmedo.

Tabla 11. Resultados obtenidos en la extracción de almidón de rizoma de *Canna indica* l. mediante método húmedo.

Tratamiento	Tiempo de sedimentación (horas)	Temperatura de secado (°C)	Tiempo de secado (horas)	Almidón obtenido (g)	Rendimiento (%)
1	3	65	3	0.32	0.13
2	3	60	4	0.12	0.05
3	3	55	5	0.75	0.3
4	3.5	65	3	0.29	0.12
5	3.5	60	4	0.67	0.27
6	3.5	55	5	0.86	0.34
7	4	65	3	0.32	0.13
8	4	60	4	0.12	0.05

9	4	55	5	2.94	1.18
10	3.5	65	4	5.1	2.04
11	4	65	5	4	1.6
12	3	60	3	4.3	1.72
13	4	60	5	4.3	1.72
14	3	55	3	4.7	1.88
15	3.5	55	4	4.6	1.84
16	3.5	60	3	4.6	1.84
17	4	55	3	2.48	0.99
18	3	65	4	5.4	2.16
19	4	55	4	2.6	1.04
20	3	65	5	2.72	1.09
21	3.5	60	5	3.2	1.28

Para la extracción por vía húmeda se realizaron 21 pruebas en las que las variables fueron el tiempo de sedimentación, temperatura y tiempo de secado. Estas tres características están relacionadas directamente con el rendimiento del almidón del rizoma de *Canna indica* L.

El tiempo de sedimentación, por ejemplo, es importante ya que de este depende que la separación del almidón con el resto de fibra del rizoma sea favorable, pues un tiempo prolongado permitió que las partículas de almidón se asentaran en su totalidad, logrando una mayor pureza y rendimiento. Por el contrario, tiempos cortos hacían que el rendimiento fuera menor ya que el almidón no lograba asentarse totalmente.

Por otro lado, tanto la temperatura como el tiempo de secado son esenciales para eliminar el exceso de humedad en las muestras de almidón extraído, sin embargo, temperaturas altas y tiempos elevados indujeron en la desnaturalización del almidón, mientras que a temperaturas demasiado bajas así como tiempos, el secado fue ineficiente, ya que se mantuvo un alto contenido de humedad que afectó negativamente la pureza del almidón. Por lo tanto, temperaturas y tiempos demasiado altas o bajas redujeron tanto la calidad como el rendimiento del almidón.

Al correlacionar el rendimiento obtenido con las combinaciones de estas variables, se identificaron condiciones idóneas que favorecen la eficiencia de la extracción de almidón por el método húmedo.

4.3 Extracción de almidón en rizoma de *Canna indica* l. por método enzimático

Los resultados obtenidos a partir de los 21 experimentos que se llevaron a cabo por el método enzimático por medio de la combinación de variables de tiempo de incubación (enzima celulasa-rizoma), temperatura de incubación y concentración de la enzima celulasa, se muestran en la siguiente tabla. El rendimiento del almidon obtenido se calculó y se expresó en términos de porcentaje.



Figura 36. Almidón del rizoma de *Canna indica* l. obtenido por método enzimático.

Tabla 12. Resultados obtenidos en la extracción de almidon de rizoma de *Canna indica* l. mediante método enzimático.

Tratamiento	Tiempo de incubación (horas)	Temperatura de incubación (°C)	Concentración de la enzima (g/g)	Almidón obtenido	Rendimiento (%)
1	2	45	0.2	9.57	3.83
2	2	55	0.4	7.13	2.85
3	2	65	0.6	6.6	2.64
4	4	45	0.2	3.13	1.25
5	4	55	0.4	4.91	1.96
6	4	65	0.6	2.32	0.93
7	6	45	0.2	5.42	2.17
8	6	55	0.4	1.26	0.5
9	6	65	0.6	2.74	1.1
10	4	45	0.4	3.49	1.4
11	6	45	0.6	1.99	0.8
12	2	55	0.2	5.6	2.24
13	6	55	0.6	2.28	0.91
14	2	65	0.2	4.83	1.93

15	4	65	0.4	0.79	0.32
16	4	55	0.2	0.65	0.26
17	6	65	0.2	6.08	2.43
18	2	45	0.4	8.13	3.25
19	6	65	0.4	1.22	0.49
20	2	45	0.6	3.54	1.42
21	4	55	0.6	3.01	1.2

La tabla de resultados de 21 experimentos de extracción de almidón de rizoma de *Canna indica* l. por vía enzimática, esta muestra la combinación de tres variables: tiempo de incubación en donde se consideraron 2, 4 y 6 horas, temperatura de incubación a tres temperaturas 45°C, 55°C y 65°C, y concentración de la enzima celulasa (0.2, 0.4 y 0.6). Los rendimientos de almidón obtenidos, los cuales son expresados en porcentaje, reflejan una variabilidad dependiendo de las condiciones de incubación. Por ejemplo, el mayor rendimiento fue de 3.828%, este se obtuvo con 2 horas de incubación a 45°C y una concentración de enzima de 0.2, mientras que el menor rendimiento (0.26%) se observa con 4 horas de incubación a 55°C y una concentración de enzima de 0.2 g/g. En general, no se observa una tendencia de aumento del rendimiento con el incremento de una sola variable, lo que significa que el rendimiento de almidón depende de una combinación específica de tiempo, temperatura y concentración de enzima.

4.4 Análisis estadístico para la extracción por método seco

Se llevó a cabo el análisis del método de extracción de almidón por vía seca, para evaluar el efecto de distintos tratamientos con respecto al rendimiento obtenido en cada una de estas.

Para ello se realizó el gráfico de barras en donde se graficaron los 48 tratamientos contra el rendimiento (%) del almidón obtenido en cada uno.

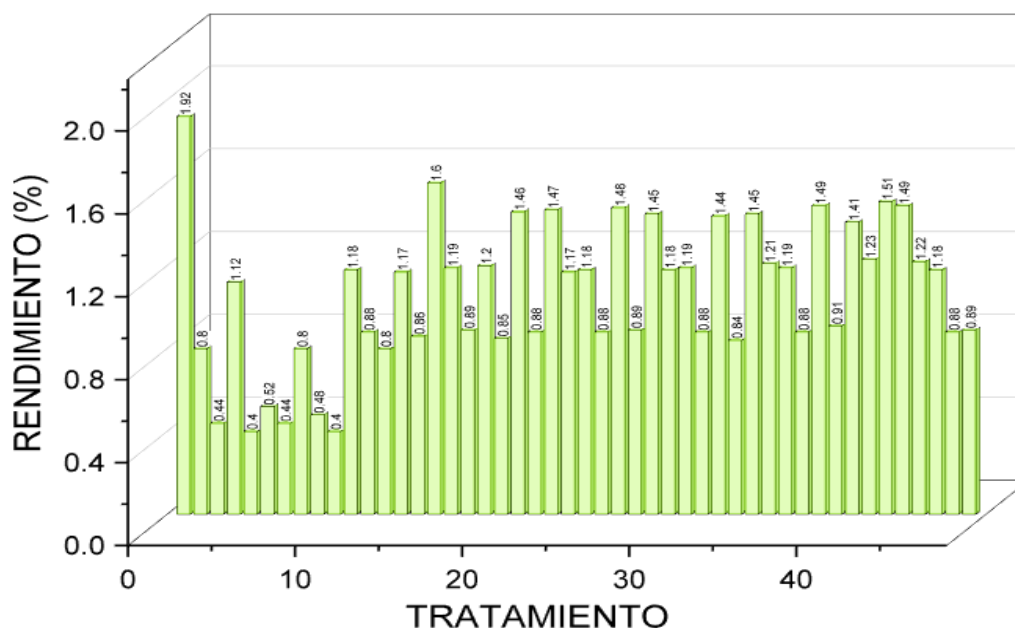


Figura 37. Gráfica de barras del rendimiento obtenido en los tratamientos por método seco.

En la figura 39, se observa que el tratamiento 1 fue en el que se obtuvo mayor rendimiento con 1.92%, mientras que los rendimientos más bajos se obtuvieron en igual medida en los tratamientos 3, 5, 7 y 10 con 0.4%. Por otro lado, el tratamiento 16 fue el segundo con mayor rendimiento con 1.6%. Se muestra que en el resto de los tratamientos, el rendimiento de almidón obtenido varía entre 0.8, 1.2 y 1.4, lo que sugiere que no hay una gran diferencia entre las condiciones que se manejan después de las del tratamiento 1, el cual consiste en: concentración 1 de metabisulfito de sodio al 0.5, temperatura 1 de contacto (metabisulfito-rizoma) a 38°C, con un tiempo de contacto de 15 min, concentración 2 de metabisulfito de sodio al 0.8, a 15 min de tiempo de contacto, secando el almidón obtenido a 40°C durante 45 horas.

Además de la gráfica de barras, se calcularon algunas estadísticas descriptivas que se muestran a continuación:

Tabla 13. Estadísticos descriptivos de los resultados obtenidos en la extracción de almidón de rizoma de *Canna indica* L. mediante método seco.

	N total	Media	Desviación estándar	Suma	Mínimo	Mediana	Máximo
Rendimiento (%)	48	1.06812	0.35176	51.27	0.4	1.17	1.92

Se muestra el número total de tratamientos realizados, el promedio de los rendimientos que es de 1.06812, la desviación estándar de 0.35176, la mediana de 1.17, así como los valores mínimos y máximos que, como se mencionó, son los valores con menor y mayor rendimiento, los cuales son de 0.4% y 1.92% respectivamente.

Estas estadísticas proporcionan una idea de la tendencia central y la dispersión de los datos. La media y la mediana están relativamente cerca, lo que indica una distribución bastante simétrica.

La desviación estándar muestra que los datos se desvían 0.35176 unidades del valor promedio, es decir, que la mayoría de los valores en el conjunto de datos se encuentran dentro del rango de aproximadamente 1.068 ± 0.351 (entre 0.72 y 1.42) lo que se mencionó anteriormente, pues la gran mayoría de los tratamientos realizados se encuentra dentro de ese rango por lo que la variación en las condiciones no es significativa, mientras que para el tratamiento 1, las condiciones trabajadas hicieron que se obtuviera un rendimiento mayor, de 1.92%, con respecto a los demás tratamientos.

Según lo reportado por Andrade-Mahecha et al. (2012) en un estudio realizado en *Canna indica* L. en variedad brasileña, el rendimiento de almidón obtenido por extracción seca fue de 6,3%, el cual es alto comparado con el rendimiento obtenido en esta extracción (1.92%), sin embargo, no se trata de la misma variedad, pues en la región de Misantla, esta planta aún no ha sido estudiada.

Además, como menciona el autor (Andrade-Mahecha et al., 2012) las diferencias en el rendimiento de extracción pueden estar asociadas con la etapa de madurez del rizoma, ya que

los rizomas en los que se obtuvo 6.3% de rendimiento se cosecharon a los 7 meses de edad, mientras que información de productores colombianos reportaron que el almidón de *Canna indica* comercial de rizomas de 12 meses de edad obtuvieron un rendimiento de extracción de 14%. No obstante, en el contexto de esta investigación, no es posible determinar con precisión la edad de los rizomas utilizados, ya que, al ser plantas de desecho recolectadas en fincas, se obtienen en conjunto sin información detallada sobre sus características de cultivo.

4.5 Análisis estadístico para la extracción por método húmedo

Se realizó el análisis del método de extracción de almidón por vía húmeda con el propósito de evaluar el impacto de los 21 tratamientos en el rendimiento obtenido. Para ello, se elaboró un gráfico de barras que muestra los experimentos frente al rendimiento porcentual de almidón obtenido en cada uno de ellos.

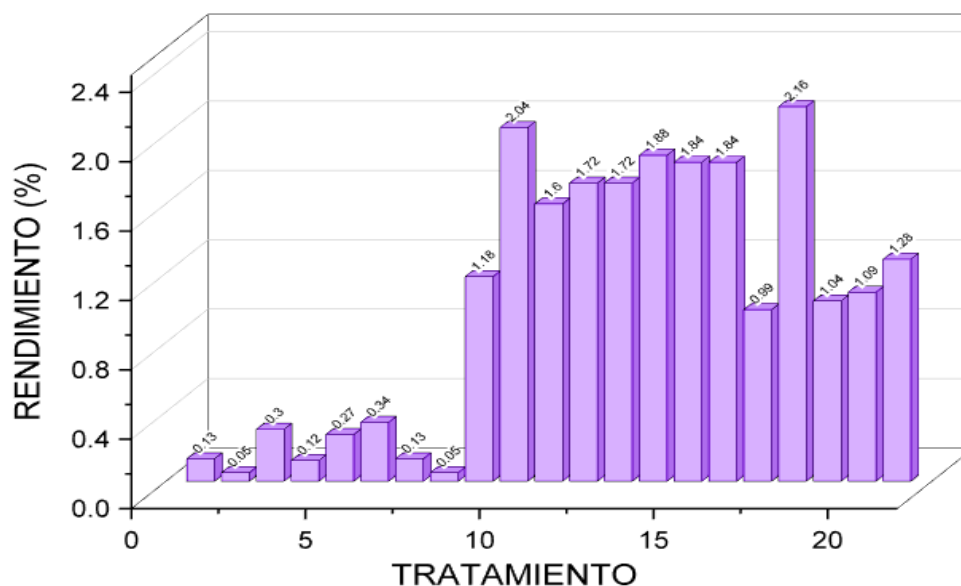


Figura 38. Gráfica de barras del rendimiento obtenido en los tratamientos por método húmedo.

Se observa que los tratamientos que menor porcentaje de rendimiento de almidón obtuvieron son del 1 al 8, pues todos ellos fueron menores a 0.4%. A partir del tratamiento 9, se observa un aumento significativo en el rendimiento, debido a que, en dichos tratamientos, el tiempo de sedimentación que se dejó, fue mayor, lo que permitió mayor recuperación de

almidón. Por otro lado, los tratamientos que rindieron mayor cantidad de almidón fueron los 10 y 18, con 2.04% y 2.16% respectivamente. Mientras que el resto de los tratamientos oscilaron en valores de 1.18% y 1.28%, por lo tanto, se puede decir que el tratamiento 18 fue el mejor bajo condiciones de tiempo de sedimentación de 4 horas, dejando en secado a 55°C durante 4 horas.

Tabla 14. Estadísticos descriptivos de los resultados obtenidos en la extracción de almidón de rizoma de *Canna indica* l. mediante método húmedo.

	N total	Media	Desviación estándar	Suma	Mínimo	Mediana	Máximo
Rendimiento (%)	21	1.03667	0.76334	21.77	0.05	1.09	2.16

Se calcularon estadísticas descriptivas que se muestran en la tabla 14, en donde se observa que el promedio de los tratamientos es de 1.03667, con una desviación estándar del 0.76334, es decir, los datos en este método se desvían 0.76334 unidades del valor promedio (1.03667), lo que indica que la mayoría de los valores están dispersos alrededor de la media pues el rango va desde 0.05 hasta 2.16, mostrando una amplia variabilidad en los rendimientos.

Por otro lado, el valor mínimo es de 0.05, media de 1.09 y valor máximo de 2.16, que son los valores del tratamiento con menor y mayor rendimiento de almidon obtenido. Además, el valor del promedio (1.03667) y la mediana (1.09) están bastante cercanas, lo que sugiere que la distribución del rendimiento es relativamente simétrica.

El mayor rendimiento obtenido en este método de extracción por vía húmeda para el rizoma de *Canna indica* l. de la región de Misantla, fue de 2.16%, sin embargo, no hay reportes del rendimiento obtenido de almidon del rizoma de esta planta, pues autores como Fonseca-López et al. (2019) realizaron la extracción de almidon en rizoma de *Canna indica* l. en donde compararon dos métodos por vía húmeda uno por licuado y otro por rallado, sin embargo, el informe de resultados solo abarcó hasta la comparación de los métodos de extracción y sus características fisicoquímicas, dejando de lado el rendimiento obtenido en cada uno de estos.

Por otra parte, este rendimiento es bastante bajo comparado con otros tuberculos como la yuca, papa y camote, pues de acuerdo a Callisaya & Mendoza (2022) el rendimiento de almidón

obtenido a partir de la extracción de estos indica que, a partir de un peso inicial de 1 kg de cada producto, se obtuvo un total de 9.72% de almidón de papa, 20.4% de almidón de yuca y 9.51% de almidón de camote. Estos valores son mucho mayores que el obtenido en esta investigación, sin embargo, la papa, yuca y camote son tuberculos que contienen una mayor cantidad de almidon y son utilizados mayoritariamente en la industria, al contrario de la *Canna indica l.* la cual es una planta poco estudiada y considerada, al menos en la región de Misantla, maleza entre los cultivos de la región por lo que es desechada y desaprovechada.

4.6 Análisis estadístico para la extracción por método enzimático

Se llevo a cabo el análisis del método de extracción de almidón por vía enzimática con el fin de evaluar el impacto de los 21 tratamientos en el rendimiento obtenido. Por lo cual, se elaboró una gráfica de barras que muestra los experimentos frente al rendimiento porcentual de almidón obtenido en cada uno de ellos.

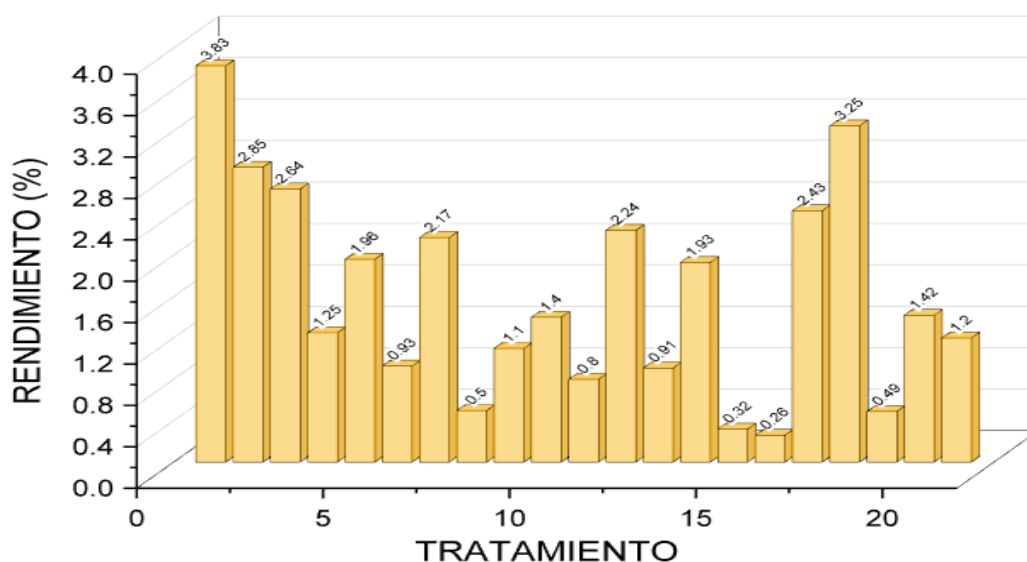


Figura 39. Grafica de barras del rendimiento obtenido en los tratamientos por método enzimático.

En la figura 41, se observa que los tratamientos en los que se recuperó mayor cantidad de almidón del rizoma de *Canna indica l.* fue en el 1 con 3.83% y el tratamiento 18 con 3.25%. Los tratamientos en los que se obtuvieron datos similares fueron los 2, 3 7, 12 y 17 con

rendimientos que oscilaron entre 2.64% y 2.85%. Por otra parte, en los tratamientos 8, 15, 16 y 19 se observan los rendimientos más bajos con 0.5%, 0.32%, 0.26% y 0.49% respectivamente. El resto de los tratamientos se encuentra dentro del rango de 0.8% a 1.96%. Por lo tanto, se puede concluir que el tratamiento que mejor se adapta a este método de extracción de almidón por vía seca para el rizoma de *Canna indica* L. es el primero bajo las siguientes condiciones: concentración de la enzima celulasa de 0.2, tiempo de incubación (enzima-rizoma) de 2 horas a 45°C.

Además de la gráfica de barras, se calcularon algunas estadísticas descriptivas que se muestran a continuación:

Tabla 15. Estadísticos descriptivos de los resultados obtenidos en la extracción de almidón de rizoma de *Canna indica* L. mediante método enzimático.

	N total	Media	Desviación estándar	Suma	Mínimo	Mediana	Máximo
Rendimiento (%)	21	1.61333	1.00109	33.88	0.26	1.4	3.83

Se muestra el número total de datos (21 tratamientos) con un valor promedio de 1.613, desviación estándar de 1.00, mientras que el valor mínimo es de 0.26 y valor máximo 3.83, es decir, que el tratamiento con menor rendimiento es el 16 y el tratamiento 1 es donde se obtuvo mayor cantidad de almidón.

Estas estadísticas proporcionan una idea de la tendencia central y la dispersión de los datos. Se observa que la media (valor promedio) y la mediana están relativamente cerca entre sus valores (1.613 y 1.4), lo que significa que los datos tienen una distribución simétrica.

En cuanto a la desviación estándar, esta muestra que los datos se desvían 1 unidad del valor promedio (1.613), por lo que la mayoría de los valores en el conjunto de datos se encuentran dentro del rango de 1.613 ± 1 (entre 0.613 y 2.613) lo que se mencionó anteriormente, pues la gran mayoría de los tratamientos realizados se encuentra dentro de ese rango, la variación en las condiciones no es significativa, mientras que para el tratamiento 1, las condiciones trabajadas hicieron que se obtuviera un rendimiento mayor.

Entonces, para la extracción de almidón del rizoma de *Canna indica* L. por método enzimático el rendimiento es de 3.83%, que, comparada con el obtenido en papa por Hameed et

al., (2020) es bajo, ya que este fue del 89%. De igual manera, Sit et al., (2015) llevaron a cabo la extracción enzimática de almidón en Taro evaluando la combinación de enzimas celulasa y xilanasa en donde la condición optimizada con máximo rendimiento de almidón fue de 17,22 %. Estos datos son relativamente altos comparados con el rendimiento obtenido en este método (3.83%), sin embargo, la papa y el Taro son tubérculos con mayor cantidad de almidón, y existen distintas investigaciones en las que se reportan los distintos rendimientos que pueden llegar a tener, caso contrario en la *Canna indica l.* (papata ratón), que, si bien es una planta poco estudiada, al momento, no se reporta información en donde se aplique la extracción enzimática para el rizoma.

4.7 Comparación entre métodos

Los datos del rendimiento obtenido se evaluaron en conjunto con cada método de extracción, con el fin de determinar, mediante análisis estadístico, la técnica que mejor resulta para la obtención de almidón en rizoma de *Canna indica l.*

Se realizó el análisis de varianza para una vía (ANOVA), el cual se emplea para determinar si existen diferencias significativas entre las medias de tres o más grupo, por lo que se ajusta a los datos, pues se tienen tres métodos (factor) cada uno con datos de rendimiento. Por lo tanto, el ANOVA de una vía se utilizó para comparar los rendimientos medios de almidón obtenidos mediante tres métodos, es decir, seco, húmedo y enzimático. Este análisis ayuda a determinar si existen diferencias significativas entre los métodos, lo que permite decidir finalmente que método es más apto.

Tabla 16. ANOVA de una vía para la comparación de rendimientos entre los tres métodos de extracción de almidón en *Canna indica l.*

Estadísticas descriptivas					
MÉTODO	N Análisis	N Faltantes	Media	Desviación estándar	Desviación estándar de la Media
Seco	48	0	1.06812	0.35176	0.05077
Húmedo	21	0	1.03667	0.76334	1.16657
Enzimático	21	0	1.61333	1.00109	0.21846
ANOVA de una vía					
ANOVA General					

	Grados de libertad (DF)	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Prob>F								
Modelo	2	4.96978	2.48489	5.76296	0.00446								
Error	87	37.51286	0.43118										
Total	89	42.48264											
Hipótesis Nula: Las medias de todos los niveles son iguales. Hipótesis Alternativa: Las medias de uno o más niveles son diferentes. Conclusión: Al nivel de significancia 0.05, las medias de la población son significativamente diferentes. Estadísticas de Ajuste <table><tr><th>R-Cuadrada</th><th>Coficiente de variación</th><th>Raíz del Error Cuadrático Medio (MSE)</th><th>Media de los datos</th></tr><tr><td>0.11698</td><td>0.55273</td><td>0.65664</td><td>1.188</td></tr></table>						R-Cuadrada	Coficiente de variación	Raíz del Error Cuadrático Medio (MSE)	Media de los datos	0.11698	0.55273	0.65664	1.188
R-Cuadrada	Coficiente de variación	Raíz del Error Cuadrático Medio (MSE)	Media de los datos										
0.11698	0.55273	0.65664	1.188										

En el análisis comparativo de los métodos de extracción de almidón se observa que el método enzimático mostró el mayor rendimiento promedio de almidón (1.61333), indicando que es mejor en términos de cantidad de almidón extraído. Sin embargo, este método también presenta una variabilidad grande en comparación con los otros dos métodos, pues su desviación estándar es de 1.00109, lo que puede indicar que los resultados son inconsistentes. Por otra parte, el método seco, si bien tiene un rendimiento promedio más bajo (1.06812), su desviación estándar es de 0.35176 por lo que variabilidad del rendimiento en este es menor, indicando una mayor consistencia. Mientras que el método húmedo, con un rendimiento promedio de 1.03667 y una desviación estándar de 0.76334, se sitúa intermedio tanto en rendimiento como en consistencia.

Los resultados que se muestran en el ANOVA indican que el método enzimático presenta el mayor rendimiento promedio con 1.61333, seguido por el método seco con 1.06812 y el método húmedo con 1.03667. El valor de p obtenido es de 0.00446, lo que indica que hay diferencias significativas entre los métodos, pues es menor al nivel de significancia (0.05). Esto quiere decir, que no todas las medias de los métodos son iguales y que al menos uno de estos métodos es diferente de los otros.

Una vez que se sabe que existen diferencias significativas entre los métodos, se aplicó la prueba de Turkey con el fin de determinar y confirmar cuál método es estadísticamente mejor, ya que esta prueba ayuda a comparar pares de medias para identificar específicamente cuales métodos son significativamente diferentes entre sí.

Tabla 17. Prueba de Turkey para la comparación de rendimientos entre los tres métodos de extracción de almidón en *Canna indica* l.

Prueba de Turkey

	Diferencia de Medias	Error Estándar de la Media (SEM)	Valor q	Probabilidad	Alfa	Sig	Límite de Confianza Inferior (LCL)	Límite de Confianza Superior (UCL)
Húmedo-Seco	-0.03146	0.1718	0.25896	0.98169	0.05	0	-0.44111	0.3782
Enzimático-Seco	0.54521	0.1718	4.488	0.00585	0.05	1	0.13555	0.95486
Enzimático-Húmedo	0.57667	0.20264	4.02443	0.01512	0.05	1	0.09346	1.05987

Tabla de Agrupación por Letras

Prueba de Turkey

	Media	Grupos	
Enzimático	1.61333	A	
Seco	1.06812		B
Húmedo	1.03667		B

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Se puede observar en la tabla 17 de la prueba de Tukey se demuestra que el método enzimático es significativamente mayor en cuanto a términos de rendimiento medio de almidón comparado con los otros dos métodos. Comparando el método enzimático con el método seco, presenta una diferencia de medias de 0.54521, mientras que contra el método húmedo la diferencia es de 0.57667,

con valores de p de 0.00585 y 0.01512, respectivamente, lo que sugiere que estas diferencias son estadísticamente significativas. Por lo tanto, se puede decir que el método enzimático produce significativamente más almidón en comparación con el método seco y húmedo.

Por otro lado, la comparación entre los métodos seco y húmedo no muestra una diferencia significativa, pues tienen una diferencia de medias negativa de -0.03146, con un valor p de 0.98169, lo que significa que estos métodos no difieren en cuanto a su rendimiento.

Todo esto, se confirma en la tabla de agrupación con letras, en donde se observa que el método enzimático se encuentra en el grupo A, mientras que el método seco y el método húmedo son parte del grupo B, indicando de esta manera que los rendimientos de estos dos son comparables entre sí, pero no lo son con el método enzimático.

Gráficamente se puede visualizar en la siguiente figura, como el método de extracción enzimático es mucho más alto que los otros dos métodos con un rendimiento de 3.83%.

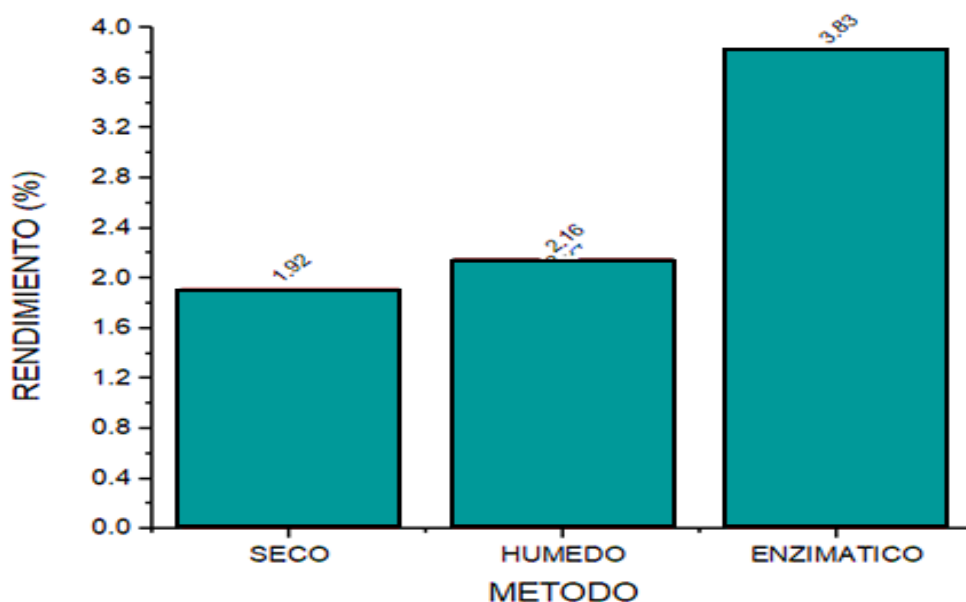


Figura 40. Comparación entre métodos de extracción de almidón del rizoma de *Canna indica* l.

4.8 Implementación de técnicas de inteligencia artificial

Con el fin de mejorar y conocer mejor cómo se comportan las variables involucradas en los métodos de extracción de almidón, se llevó a cabo la implementación de técnicas de inteligencia artificial, utilizando redes neuronales y el algoritmo Random Forest para predecir el rendimiento de almidón obtenido mediante los métodos seco y húmedo, respectivamente.

Para el método seco, las variables clave incluyeron la concentración de metabisulfito de sodio (considerada en dos tratamientos: concentración 1 y concentración 2), el tiempo de contacto (de igual forma en 2 tratamientos), la temperatura de contacto, la temperatura de secado y el tiempo de secado. Estas variables fueron integradas en un modelo de red neuronal, el cual tenía como objetivo capturar las complejas relaciones no lineales entre las variables de entrada y el rendimiento del almidón. Las redes neuronales, con su capacidad para aprender patrones y características ocultas en los datos, proporcionaron una predicción precisa y robusta del rendimiento, permitiendo así ajustar los parámetros de proceso para maximizar la eficiencia de extracción.

A continuación, se describen los resultados obtenidos en la implementación de esta técnica:

La estructura de la red neuronal incluye:

Tabla 18. Características de la red neuronal.

Capa	Neuronas	Función de Activación
Entrada	8	ReLU
Oculto	4	ReLU
Salida	1	Linear

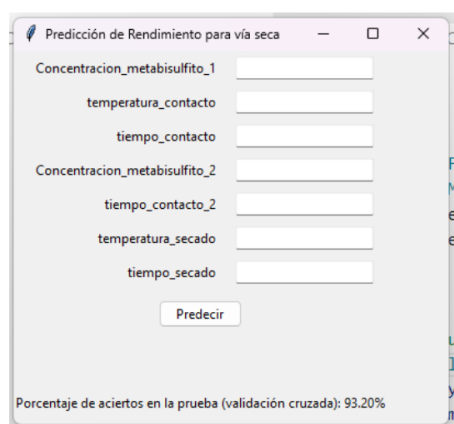
Además, se especifica que el modelo se entrena durante 200 épocas con un tamaño de 8 por lote. Una vez establecidas las características, se ingresan las variables de entrada, las cuales son:

- Concentración Metabisulfito 1
- Temperatura de Contacto
- Tiempo de Contacto
- Concentración Metabisulfito 2
- Tiempo de Contacto 2

- Temperatura de Secado
- Tiempo de Secado
- Proceso de Entrenamiento

Se detalla que el modelo se entrena utilizando validación cruzada (K-Fold) con 5 folds, 300 épocas y un tamaño de lote de 8. Además, se explica que la precisión se evalúa mediante el cálculo del error cuadrático medio (MSE) en cada fold, y se presenta como un porcentaje de aciertos el porcentaje de aciertos se calcula como 100% menos el MSE promedio, proporcionando así una medida de rendimiento en la predicción del conjunto de datos.

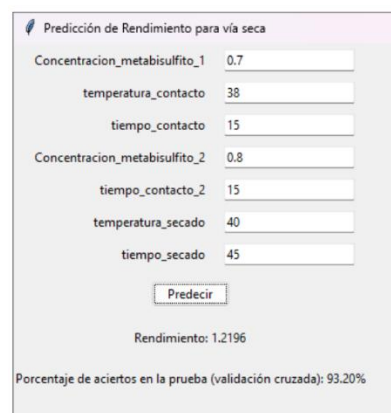
La interfaz gráfica permite ingresar valores para cada una de las variables, ya que al hacer clic en el botón "Predecir", el modelo utiliza estos valores para realizar una predicción de rendimiento, que se muestra en la interfaz. La tabla de predicción se observa a continuación:



The screenshot shows a window titled 'Predicción de Rendimiento para vía seca'. It contains several input fields for variables: 'Concentracion_metabisulfito_1', 'temperatura_contacto', 'tiempo_contacto', 'Concentracion_metabisulfito_2', 'tiempo_contacto_2', 'temperatura_secado', and 'tiempo_secado'. Below these fields is a button labeled 'Predecir'. At the bottom of the window, it displays 'Porcentaje de aciertos en la prueba (validación cruzada): 93.20%'.

Figura 41. Interfaz gráfica para el método de extracción seco antes de colocar datos.

Figura 42. Interfaz gráfica para el método de extracción seco con datos.



This screenshot shows the same interface as Figure 41, but with numerical values entered in the input fields: 'Concentracion_metabisulfito_1' is 0.7, 'temperatura_contacto' is 38, 'tiempo_contacto' is 15, 'Concentracion_metabisulfito_2' is 0.8, 'tiempo_contacto_2' is 15, 'temperatura_secado' is 40, and 'tiempo_secado' is 45. The 'Predecir' button is highlighted with a dashed border. Below the button, it shows 'Rendimiento: 1.2196'. At the bottom, it displays 'Porcentaje de aciertos en la prueba (validación cruzada): 93.20%'.

El modelo de red neuronal implementado en la interfaz gráfica se entrena y evalúa utilizando un enfoque de validación cruzada. La interfaz proporciona una forma interactiva de ingresar datos y obtener predicciones de rendimiento basadas en el modelo entrenado. La

precisión del modelo se presenta en términos de porcentaje de aciertos durante la validación cruzada.

Para el método húmedo, se empleó el algoritmo de Bosques Aleatorios (Random Forest, el cual es conocido por su capacidad para manejar grandes conjuntos de datos y su eficacia en la reducción del sobreajuste. Para este método, las variables consideradas fueron el tiempo de sedimentación, la temperatura y el tiempo de secado.

La robustez del Random Forest permitió manejar la variabilidad en los datos experimentales y generar un modelo de predicción de rendimiento de almidón. Este modelo no solo facilitó la comprensión de la influencia individual de cada variable sobre el rendimiento de almidón, sino que también permitió identificar las combinaciones óptimas de las mismas para mejorar la extracción.

Cabe señalar que este algoritmo es una técnica de conjunto que construye múltiples árboles de decisión durante el entrenamiento y los combina para obtener un modelo más robusto y preciso.

La interfaz gráfica consistió en las siguientes características:

- Tiempo de Sedimentación
- Temperatura de Secado
- Tiempo de Secado

El modelo utiliza los valores ingresados para realizar una predicción de rendimiento. Los resultados de la predicción se muestran en la interfaz gráfica.

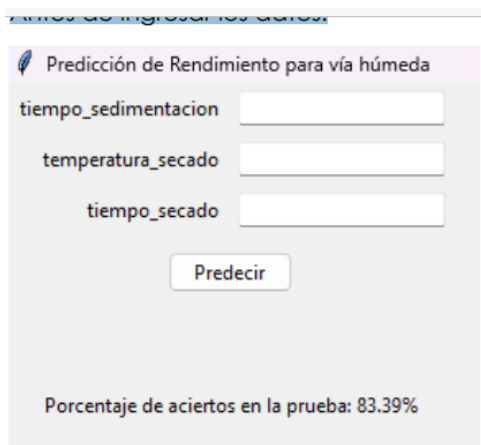
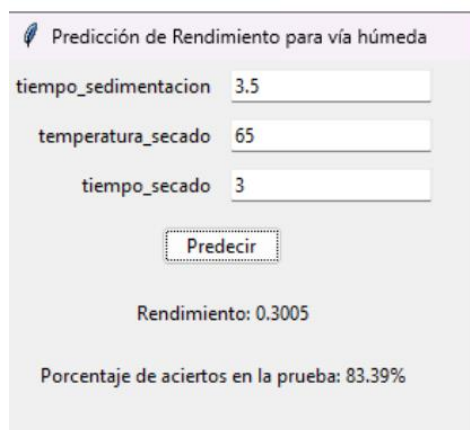


Figura 43. Interfaz gráfica para el método de extracción húmedo con datos.



Predicción de Rendimiento para vía húmeda

tiempo_sedimentacion 3.5

temperatura_secado 65

tiempo_secado 3

Predecir

Rendimiento: 0.3005

Porcentaje de aciertos en la prueba: 83.39%

Figura 44. Interfaz gráfica para el método de extracción húmedo con datos ejemplo.

El conjunto de datos se dividió en características (X) y etiquetas (y), donde las características representaban las variables de entrada y la etiqueta es la variable de rendimiento que se busca predecir. Además, los datos se normalizaron entre 0 y 1 utilizando la función MinMaxScaler, este paso es importante ya que se asegura que todas las características tengan la misma escala, lo que facilita el entrenamiento y mejora la convergencia del modelo. De igual forma, se utilizó la métrica de error cuadrático medio (MSE) para evaluar el rendimiento del modelo en el conjunto de prueba. Este indicador mide la diferencia cuadrática promedio entre las predicciones y las etiquetas reales.

El modelo de regresión implementado utilizando Random Forest se entrenó y evaluó con éxito. La interfaz gráfica proporciona una forma intuitiva para ingresar valores y obtener predicciones de rendimiento. La precisión del modelo se presenta en términos de porcentaje de aciertos en el conjunto de prueba. Este enfoque permite una fácil interpretación y aplicación del modelo en situaciones prácticas

La implementación de estas técnicas de inteligencia artificial no solo ha llevado a una mejora significativa en la precisión de las predicciones de rendimiento, sino que también ha proporcionado una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones en el campo de la extracción de almidón.

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

En la presente investigación se evaluó el proceso de extracción de almidón a partir del rizoma de *Canna indica* L., utilizando tres métodos: húmedo, seco y enzimático. Cada uno de estos involucró la variación de diversas variables, como el tiempo de sedimentación, concentración de metabisulfito de sodio, temperaturas de contacto, concentración de enzima celulasa, tiempos de contacto, temperaturas y tiempos de secado, con el fin de hallar en cual técnica se obtiene un mayor rendimiento y a partir de ahí elegir las mejores condiciones del proceso seleccionado. Para ello, se realizaron experimentos sistemáticos y se aplicaron técnicas de análisis estadístico para interpretar los datos obtenidos.

Se graficó cada método por separado y se realizaron estadísticas descriptivas que ayudaron a determinar el mejor tratamiento para cada método así como el tratamiento en el que menor rendimiento de almidón se obtuvo. Estas estadísticas proporcionaron una idea de la tendencia central y la dispersión de los datos de los tres métodos en donde el valor de las medias (valor promedio) y las medianas, al no diferir mucho entre sí, indicaron que, para los tres métodos, se trataba de una distribución simétrica.

Para el método seco, las condiciones bajo las que se obtuvo mayor rendimiento de almidón del 1.92% fue con una concentración 1 de metabisulfito de sodio al 0.5, temperatura y tiempo 1 de contacto (metabisulfito-rizoma) a 38°C durante 15 min, concentración 2 de metabisulfito de sodio al 0.8, a 15 min de tiempo de contacto, secando el almidón obtenido a 40°C durante 45 horas. En el caso del método húmedo las condiciones fueron: tiempo de sedimentación de 4 horas, dejando en secado a 55°C durante 4 horas, en las cuales se obtuvo el rendimiento de almidón de 2.16%. Mientras que para el método enzimático se obtuvo un rendimiento mayor con 3.83% de almidón recuperado con las condiciones de concentración de la enzima celulasa de 0.2, tiempo de incubación (enzima-rizoma) de 2 horas a 45°C.

Se realizó el análisis estadístico aplicando el ANOVA de una vía, el cual mostró que había diferencias significativas en los rendimientos medios de almidón obtenidos mediante los tres

métodos de extracción, con un valor de p de 0.00446, por lo tanto, para poder identificar específicamente cuáles métodos eran diferentes entre sí, se aplicó la prueba de Tukey.

Los resultados de la prueba de Tukey arrojaron que el método enzimático tiene un rendimiento medio mayor (1.61333) en comparación con el método seco, el cual es de 1.06812 y el método húmedo con 1.03667, además las diferencias de medias entre el método enzimático y los otros dos métodos fueron de 0.54521 y 0.57667, respectivamente, con valores de p de 0.00585 y 0.01512, lo que confirma la significancia estadística de estas diferencias. Por otra parte, la comparación entre los métodos seco y húmedo no mostró una diferencia significativa, pues tienen una diferencia de medias negativa (-0.03146) y un valor de p de 0.98169, lo que sugiere que sus rendimientos medios de almidón son bastante similares. Lo anterior se confirmó con la tabla de agrupación de letras que proporcionó una visualización clara de estos resultados, mostrando que el método enzimático pertenece al grupo A, mientras que los otros dos métodos se agrupan en el B.

Por lo tanto, el método enzimático es el más eficaz en términos de rendimiento medio de almidón, ofreciendo una ventaja clara sobre los métodos seco y húmedo.

Adicionalmente, se implementaron técnicas de inteligencia artificial para predecir el rendimiento de almidón. En particular, se utilizaron redes neuronales para el método seco y bosques aleatorios para el método húmedo, permitiendo así una comprensión más profunda y precisa del comportamiento del proceso bajo diferentes condiciones experimentales.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar análisis fisicoquímicos adicionales al almidón extraído, ya que estos estudios permitirán no solo evaluar la calidad y pureza del producto final, sino también identificar sus propiedades funcionales que podrían ampliar su uso en diversas aplicaciones industriales, como en la alimentaria, la farmacéutica, la textil, la papelera, entre otras.

Además, se sugiere realizar un estudio de viabilidad financiera, con el fin de evaluar los costos asociados con cada método de extracción y su potencial rentabilidad en una escala comercial. Este análisis permitirá identificar las opciones más rentables y sostenibles, esto

complementará a la elección del mejor método de extracción, garantizando que la implementación a gran escala sea económicamente viable y competitiva en el mercado.

Por último, se recomienda la incorporación de técnicas de inteligencia artificial en el proceso de extracción enzimática del almidón con el fin de optimizar y predecir las condiciones óptimas de extracción, mejorar el control de calidad y ajustar las variables del proceso para maximizar el rendimiento y la calidad del almidón extraído.

Referencias

- Aboubakar, Njintang, Y. N., Scher, J., & Mbofung, C. M. F. (2008). Physicochemical, thermal properties and microstructure of six varieties of taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) flours and starches. *Journal of Food Engineering*, 86(2), 294–305. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.10.006>
- Altemimi, A. B. (2018). Extraction and optimization of potato starch and its application as a stabilizer in yogurt manufacturing. *Foods*, 7(2). <https://doi.org/10.3390/foods7020014>
- Andrade-Mahecha, M. M., Tapia-Blácido, D. R., & Menegalli, F. C. (2012a). Physical-chemical, thermal, and functional properties of achira (*Canna indica* L.) flour and starch from different geographical origin. *Starch/Staerke*, 64(5), 348–358. <https://doi.org/10.1002/star.201100149>
- Barrera, V. H., Tapia, C. G., & Monteros, A. R. (2003). *Raíces y tubérculos andinos: alternativas para la conservación y uso sostenible en el Ecuador*. https://doi.org/https://books.google.com.mx/books?id=wu-b2_m8WVYC
- Boden, M. A., & Pérez Parra, I. (2017). *Inteligencia artificial*.
- Callisaya, A. C., & Mendoza, G. J. C. (2022). EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE PAPA (*Solanum tuberosum*), YUCA (*Manihot esculenta*), CAMOTE (*Ipomoea batatas*). *Revista Estudiantil AGRO-VET*, 6(1), 22–28.
- Campos Wright, W., & Trujillo Casañola, Y. (2021). Redes Neuronales Artificiales en la estimación del esfuerzo Artificial Neural Networks in effort estimation. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 15(2). <http://rcci.uci.cu>Pág.183-198
- Chandra Mohan, C., Rakhavan, K. R., Sudharsan, K., Radha Krishnan, K., Babuskin, S., & Sukumar, M. (2016). Design and characterization of spice fused tamarind starch edible packaging films. *LWT - Food Science and Technology*, 68, 642–652. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2016.01.004>
- Cisneros, F. H., Zevillanos, R., & Cisneros-Zevallos, L. (2009). Characterization of starch from two ecotypes of andean achira roots (*Canna edulis*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(16), 7363–7368. <https://doi.org/10.1021/jf9004687>
- Cobana, M., & Antezana, R. (2007). PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA POR VÍA SECA. *REVISTA BOLIVIANA DE QUÍMICA*, 24 (1), 77–83.

-
- Dorantes-Fuertes, M. G., López-Méndez, M. C., Martínez-Castellanos, G., Meléndez-Armenta, R. Á., & Jiménez-Martínez, H. E. (2024). Starch Extraction Methods in Tubers and Roots: A Systematic Review. In *Agronomy* (Vol. 14, Issue 4). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/agronomy14040865>
- Esmaeily, R., Razavi, M. A., & Razavi, S. H. (2024). A step forward in food science, technology and industry using artificial intelligence. *Trends in Food Science & Technology*, 143, 104286. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2023.104286>
- Fonseca-López, D., Monroy-Fonseca, L., & Rodríguez-Molano, C. E. (2019). Effect of the method of extraction of *Canna indica* l. starch on its physicochemical properties. *Revista Lasallista de Investigacion*, 16(2), 44–52. <https://doi.org/10.22507/rli.v16n2a4>
- Fuentes, C., Perez-Rea, D., Bergenståhl, B., Carballo, S., Sjöö, M., & Nilsson, L. (2019). Physicochemical and structural properties of starch from five Andean crops grown in Bolivia. *International Journal of Biological Macromolecules*, 125, 829–838. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.120>
- Gómez-Aldapa, C. A., Castro-Rosas, J., Rangel-Vargas, E., Navarro-Cortez, R. O., Cabrera-Canales, Z. E., Díaz-Batalla, L., Martínez-Bustos, F., Guzmán-Ortiz, F. A., & Falfan-Cortes, R. N. (2019). A modified Achira (*Canna indica* l.) starch as a wall material for the encapsulation of Hibiscus sabdariffa extract using spray drying. *Food Research International*, 119, 547–553. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.031>
- Gordillo, G., & Méndez-Jerónimo Obed. (2013). SEGURIDAD Y SOBERANIA ALIMENTARIA. In *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura* (pp. 1–45). FAO. <https://www.fao.org/3/ax736s/ax736s.pdf>
- Graciela Calderón de Rzedowski, P. (n.d.). CANNACEAE*.
- Hameed, M., Ahmad, S. W., Ahmad, S., Qutab, H. G., Dasih, M., & Imran, M. (2020). Enzymatic extraction of potato starch: A parametric optimization study using response surface methodology. *Polish Journal of Chemical Technology*, 22(3), 48–54. <https://doi.org/10.2478/pjct-2020-0027>
- Hernández, M. P., Ruscitti, M. F., Calonge, F. S., Carbone, A. V., & Bueno Prieto, J. E. (2024). Estudio Fisiológico de *Canna indica* (Cannaceae), una Fuente Alimenticia, en Medios de Cultivo no Convencionales. In *Revista Ciencias Naturales* (Vol. 2, Issue 1).

-
- Hernández-medina, M., Gabriel TORRUCO-UCO, J., Chel-guerrero, L., & Betancur-ancona, D. (2008). Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas*, 28(3), 718.
- Hurrell, J. A., Bazzano, D. H., & Delucchi, G. (2005). *Monocotiledóneas Herbáceas Nativas y Exóticas*. https://www.researchgate.net/profile/Gustavo-Delucchi/publication/259397848_Biota_Rioplataense_X_Mocotiledoneas_herbaceas_nativas_y_exoticas/links/02e7e53878c5b9fe34000000/Biota-Rioplataense-X-Mocotiledoneas-herbaceas-nativas-y-exoticas.pdf
- Hermann, H. (1994). La achira y la arracacha: procesamiento y desarrollo de nuevos productos. *CIP. Circular*, 9, 10-12.
- Jiménez, R. (1980). CANNACEAE. *Instituto Nacional de Investigaciones Sobre Recursos Bióticos*, 1–11.
- Karmakar, B., Saha, S. P., Chakraborty, R., & Roy, S. (2023). Optimization of starch extraction from *Amorphophallus paeoniifolius* corms using response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN) for improving yield with tenable chemical attributes. *International Journal of Biological Macromolecules*, 237, 124183. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.124183>
- Kumbhar, S. T., Patil, S. P., & Une, H. D. (2018b). Phytochemical analysis of *Canna indica* l. roots and rhizomes extract. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 16, 50–55. <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2018.09.002>
- Kutyauripo, I., Rushambwa, M., & Chiwazi, L. (2023). Artificial intelligence applications in the agrifood sectors. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11, 100502. <https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2023.100502>
- León, E. A., Liliana, A., Cely, C., David, J., & Cañon, G. (2013). *Feasibility study, achira's starch use as fluid loss control agent in water-based muds drilling*.
- Li, Y., Wu, Z., Wan, N., Wang, X., & Yang, M. (2019). Extraction of high-amylose starch from *Radix Puerariae* using high-intensity low-frequency ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 59. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104710>
- Lin, X., Sun, S., Wang, B., Zheng, B., & Guo, Z. (2020). Structural and physicochemical properties of lotus seed starch nanoparticles prepared using ultrasonic-assisted enzymatic

-
- hydrolysis. *Ultrasonics Sonochemistry*, 68.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105199>
- Lobo-Arias, M., Medina-Cano, C. I., Grisales-Arias, J. D., Yepes-Agudelo, A. F., & Álvarez-Guzmán, J. A. (2017). Caracterización y evaluación morfológicas de la colección colombiana de achira, *Canna edulis Ker Gawl.* (Cannaceae). *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(1), 47–73.
https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num1_art:558
- Lu, T. J., Lin, J. H., Chen, J. C., & Chang, Y. H. (2008). Characteristics of taro (*Colocasia esculenta*) starches planted in different seasons and their relations to the molecular structure of starch. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(6), 2208–2215.
<https://doi.org/10.1021/jf0727894>
- Marcelo, H. P., & Arambarri, A. M. (2019). Seasonal variation of starch grains density in rhizomes of *Canna glauca* and *C. indica* (Cannaceae). *Lilloa*, 56(2), 37–46.
<https://doi.org/10.30550/j.lil/2019.56.2/3>
- Martínez Crovetto, R. 1981. Plantas utilizadas en medicina en el noroeste de Corrientes (República Argentina)”. Fundación Miguel Lillo. Miscelánea, 69, 1-139.
- Nath, P. C., Mishra, A. K., Sharma, R., Bhunia, B., Mishra, B., Tiwari, A., Nayak, P. K., Sharma, M., Bhuyan, T., Kaushal, S., Mohanta, Y. K., & Sridhar, K. (2024). Recent advances in artificial intelligence towards the sustainable future of agri-food industry. *Food Chemistry*, 447, 138945. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2024.138945>
- Oladebeye, A. O., Oladebeye, A. A., & Arawande, J. O. (2023). Physicochemical Properties of Wild Yam (*Dioscorea villosa*) Starch. *International Journal of Food Science*, 2023.
<https://doi.org/10.1155/2023/8868218>
- Ortega, M. C., Mojica-Ramos, S. L., Vergara-Navarro, E. V., & Sotelo-Cardona, P. (2020). Associated entomofauna with edible *canna* crops *canna indica* (Cannaceae) in three areas of Colombia. *Revista Colombiana de Entomología*, 46(1), 1–9.
<https://doi.org/10.25100/SOCOLEN.V46I1.10167>
- Paramakrishnan, N., Jha, S., & Kumar, K. J. (2015). Physicochemical and tablet properties of *Cyperus alulatus* rhizomes starch granules. *International Journal of Biological Macromolecules*, 76, 320–325. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.03.004>

-
- Pérez, E., Schultz, F. S., & De Delahaye, E. P. (2005). Characterization of some properties of starches isolated from *Xanthosoma sagittifolium* (tannia) and *Colocassia esculenta* (taro). *Carbohydrate Polymers*, 60(2), 139–145. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.11.033>
- Popenoe, H., King, S. R., León, J., & Kalinowski, L. S. (1989). *Lost Crops of the Incas*.
- Quiroga Ledezma, C. C. (2008). LOS ALMIDONES RESISTENTES Y LA SALUD. *INVESTIGACION & DESARROLLO*, 8(1), 130–141. <https://doi.org/10.23881/idupbo.008.1-9i>
- Silva, G. M. de S., Veloso, C. M., Santos, L. S., Melo Neto, B. A. de, Fontan, R. da C. I., & Bonomo, R. C. F. (2020). Extraction and characterization of native starch obtained from the inhambu tuber. *Journal of Food Science and Technology*, 57(5), 1830–1839. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04216-4>
- Sit, N., Deka, S. C., & Misra, S. (2015). Optimization of starch isolation from taro using combination of enzymes and comparison of properties of starches isolated by enzymatic and conventional methods. *Journal of Food Science and Technology*, 52(7), 4324–4332. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1462-z>
- Subramony NarayanaMoorthy. (2002). *Physicochemical and Functional Properties of Tropical Tuber Starches: A Review*.
- Torres, L. J. (2004). Tecnología para el cultivo de Sagú o Achira (*Canna edulis* Ker). *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Corpoica*, 1–89.
- Torres Rapelo, A., Castillo, P. M., & Duran Lengua, M. (2013). Propiedades fisicoquímicas, morfológicas y funcionales del almidón de malanga (*Colocasia esculenta*) *. *REVISTA LASALLISTA DE INVESTIGACIÓN*, 10 (2), 52–61.
- Villarroel Heise, P., Gómez, C., Vera, C., & Torres, J. (2018). Resistant starch: Technological characteristics and physiological interests. In *Revista Chilena de Nutricion* (Vol. 45, Issue 3, pp. 271–278). Sociedad Chilena de Nutricion Bromatologia y Toxilogica. <https://doi.org/10.4067/s0717-75182018000400271>
- Wang, J., Lan, T., Lei, Y., Suo, J., Zhao, Q., Wang, H., Lei, J., Sun, X., & Ma, T. (2021). Optimization of ultrasonic-assisted enzymatic extraction of kiwi starch and evaluation of its structural, physicochemical, and functional characteristics. *Ultrasonics Sonochemistry*, 81. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105866>

-
- Zárate-Polanco, L. M., Ramírez-Suárez, L M, Otálora-Santamaría, N A, Prieto1, L, Garnica-Holguín, A M, Cerón-Lasso, M S, & Argüelles, J H. (2014). EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ALMIDÓN NATIVO DE CLONES PROMISORIOS DE PAPA CRIOLLA (*Solanum tuberosum*, Grupo Phureja). *REVISTA LATINOAMERICANA DE LA PAPA*, 18(1), 1–24.
- Zou, J., Xu, M., Wen, L., & Yang, B. (2020). Structure and physicochemical properties of native starch and resistant starch in Chinese yam (*Dioscorea opposita* Thunb.). *Carbohydrate Polymers*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116188>

Anexos

Anexo 1. Reconocimiento de participación en el INNOVA TecNM 2023 con el trabajo de investigación “Extracción de almidón del rizoma de *Canna indica* L.”.



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO A TRAVÉS DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

AL PROYECTO:

Fécula de papata silvestre

Presentado por:

María Guadalupe Dorantes Fuertes
Rocio Salazar Álvarez
Cesar Augusto García Sánchez

Asesorado por:

María Cristina López Méndez
Margarito Landa Zarate

Por su participación en el **Certamen de Proyectos** de la **Cumbre Nacional de Desarrollo Tecnológico, Investigación e Innovación, InnovaTecNM 2023**, etapa local, realizado en las instalaciones del TecNM campus Misantla.

Misantla, Veracruz, 31 de mayo de 2023



MTRO. JORGE ALBERTO LARA GÓMEZ
DIRECTOR GENERAL DEL ITSM



Anexo 2. Constancia de participación en el 3er Congreso Iberoamericano de Ciencia, Educación y Tecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México.



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán

Otorga la presente

CONSTANCIA a:

María Guadalupe Dorantes Fuertes, María Cristina López Méndez, Margarito Landa Zarate, Gustavo Martínez Catellanos.

Por la su participación en la modalidad de **PRESENTACIÓN ORAL** dentro del área Ciencias de Alimentos y Agropecuarias con el trabajo:

PROCESO DE OBTENCIÓN DE ALMIDÓN DEL RIZOMA DE LA PAPATA (*Canna Indica L.*) PARA SU APROVECHAMIENTO EN DIVERSOS PRODUCTOS

Impartida en el marco del **3er Congreso Iberoamericano de Ciencia, Educación y Tecnología** y **5to Encuentro de Buenas Prácticas Docentes**, celebrado de manera virtual del 4 al 8 de Diciembre del 2023.

Dr. David Quintanar Guerrero

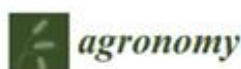
Director de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán



Folio: 202300300

Cuautitlán Izcalli a 05 de diciembre de 2023

Anexo 3. Artículo de revisión "Métodos de extracción de almidón en tubérculos y raíces" publicado a partir de la investigación realizada en esta tesis.



Review

Starch Extraction Methods in Tubers and Roots: A Systematic Review

Maria-Guadalupe Dorantes-Fuertes ¹, Maria Cristina López-Méndez ^{1,*}, Gustavo Martínez-Castellanos ¹, Roberto Ángel Meléndez-Armenta ¹ and Hugo-Emmanuel Jiménez-Martínez ²

¹ Division of Graduate Studies and Research, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Km 1.8 Carretera a Loma del Cojolite, Misantla 93821, Veracruz, Mexico; 2220496@itsm.edu.mx (M.-G.D.-F.); gmartinezac@itsm.edu.mx (G.M.-C.); ramelendez@itsm.edu.mx (R.Á.M.-A.)

² Departamento de Ingeniería Bioquímica, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Km 1.8 Carretera a Loma del Cojolite, Misantla 93821, Veracruz, Mexico; 2020657@itsm.edu.mx

* Correspondence: mclopezm@itsm.edu.mx

Abstract: Starch extraction from tubers and roots has long been an essential process, playing a crucial role in diverse industries ranging from alimentary to pharmacology. This review explores the different methods employed in starch extraction, including traditional techniques and the most innovative mechanical strategies. The methods show a good improvement in many aspects, such as an improvement in the efficiency of the process and an improvement in the yield, showing a value of 10.0–65.0% depending on the starch source. On the other hand, solvents such as NaOH are used in many mechanical processes for alkaline digestion to improve the extraction time. Ethanol and K₂S₂O₈ concentrations of 0.5% and 0.8% were used to prevent oxidation and modify some properties of the extracted starch. The use of many solvents has improved the optimization of the processes, providing the final extracted starch with more advantages and better quality. However, using enzymes such as cellulase in new and innovative ways has provided more advantages and a better efficiency and yield than the other methods. Each method has its advantages and challenges, highlighting the importance of understanding the diversity of different approaches and their impact on the yield, sustainability, environmental considerations, and quality of the extracted starch. As the world looks for more ecological approaches, this review shows the importance of critically evaluating the yield, efficiency, and environmental implications of the extraction methods, providing us with more ways of evaluating the methods used for starch extraction. The ecological impact is a crucial point when evaluating the innovation of a new extraction process, which is why methods such as ultrasound and pulsed electric-field-assisted techniques have been proposed. These methods have been presented as sustainable techniques called green technologies, offering more approaches and different advantages than the other methods. This review intends to investigate the complexities and considerations of starch extraction, providing a solid basis for decision-making regarding starch extraction. In a time where sustainability and product quality are crucial elements of industrial strategy formulation, an in-depth understanding of these methods becomes imperative to the development of responsible practices and efficiency in starch extraction.

Keywords: starch; extraction methods; tubers; root



Citation: Dorantes-Fuertes, M.-G.; López-Méndez, M.C.; Martínez-Castellanos, G.; Meléndez-Armenta, R.Á.; Jiménez-Martínez, H.-E. Starch Extraction Methods in Tubers and Roots: A Systematic Review. *Agronomy* **2024**, *14*, 865. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040865>

Academic Editors: Baskaran Stephen Inbaraj and Yulong Ren

Received: 30 January 2024

Revised: 11 April 2024

Accepted: 15 April 2024

Published: 20 April 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Starch is a food with a high energy content. It can provide different nutrients and can make necessary physicochemical changes to our aliments, allowing for variety in the uses of starch, not only in the food industry but also in different industries, such as the pharmaceutical, paper, cosmetic, textile, and polymers industries. Furthermore, it is essential to know about the starch sources presented in this review because there are many