

CARACTERIZACIÓN DEL COPRODUCTO DE LA MOLIENDA ABRASIVA DE
GRANO DE QUINOA Y SU APLICACIÓN COMO AGENTE FUNCIONAL



Universidad
del Cauca

CAMILA ANDREA CHICUE ARANGO
JUAN DAVID SARRIA MORENO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
DEPARTAMENTO DE AGROINDUSTRIA
POPAYÁN
2022

CARACTERIZACIÓN DEL COPRODUCTO DE LA MOLIENDA ABRASIVA DE
GRANO DE QUINOA Y SU APLICACIÓN COMO AGENTE FUNCIONAL

CAMILA ANDREA CHICUE ARANGO
JUAN DAVID SARRIA MORENO

Trabajo de grado en la modalidad de Investigación para optar al título de
Ingenieros Agroindustriales

Directores

Mg. JESÚS EDUARDO BRAVO GÓMEZ
Ph. D. DIEGO FERNANDO ROA ACOSTA

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
DEPARTAMENTO DE AGROINDUSTRIA
POPAYÁN
2022

NOTA DE ACEPTACIÓN:

Firma del Director

Firma del Director

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Lugar y fecha de sustentación: Virtual, 23 de Noviembre de 2022

CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-------------|
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 9 |
| 2. JUSTIFICACIÓN | 11 |
| 3. OBJETIVOS | 13 |
| 4. MARCO REFERENCIAL..... | 14 |
| 4.1 LOCALIZACIÓN | 14 |
| 4.2 MARCO TEÓRICO | 14 |
| 4.2.1 Materia prima..... | 14 |
| 4.2.2 Molienda abrasiva..... | 15 |
| 4.2.3 Espectroscopia infrarroja | 15 |
| 4.2.4 Principio de FTIR | 16 |
| 4.2.5 Reología dinámica | 16 |
| 4.2.6 Encapsulación | 17 |
| 4.2.7 Agentes encapsulantes..... | 18 |
| 4.3 MARCO HISTÓRICO | 18 |
| 5. METODOLOGÍA | 21 |
| 5.1 MATERIAL | 21 |
| 5.2 MÉTODOS | 21 |
| 5.2.1 Obtención de harina de quinua por molienda abrasiva..... | 21 |
| 5.2.2 Molienda húmeda tradicional de control. | 21 |
| 5.2.3 Espectroscopia infrarroja de rango medio por ATR. | 22 |
| 5.2.4 Propiedades de flujo | 23 |
| 5.2.5 Perfil de viscosidad..... | 23 |
| 5.2.6 Comportamiento viscoelástico | 24 |
| 5.2.7 Estabilidad de gel | 24 |
| 5.2.8 Capacidad encapsulante del coproducto de la molienda de quinua | 25 |
| 5.2.9 Preparación de las emulsiones con β -caroteno. | 25 |

| | | |
|--------|--|----|
| 5.2.10 | Liofilización de las muestras..... | 26 |
| 5.2.11 | Extracción del β -caroteno superficial y encapsulado..... | 26 |
| 5.2.12 | Comportamiento del β -caroteno superficial y encapsulado de la matriz sólida expuesta a dos temperaturas. | 28 |
| 5.2.13 | Análisis estadístico. | 28 |
| 6. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 29 |
| 6.1 | CONTENIDO DE LÍPIDOS, PROTEÍNA Y CARBOHIDRATOS DE LAS HARINAS OBTENIDAS POR MOLIENDA ABRASIVA. | 29 |
| 6.2 | ESPECTROSCOPIA INFRARROJA DE RANGO MEDIO POR ATR. | 31 |
| 6.3 | PROPIEDADES DE FLUJO Y VISCOSIDAD..... | 36 |
| 6.4 | COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO DE LA HARINA PERISPERMA.. | 38 |
| 6.5 | CAPACIDAD ENCAPSULANTE DEL COPRODUCTO DE LA MOLIENDA DE QUINUA | 39 |
| 6.5.1 | Evaluación de las matrices para la encapsulación de β -caroteno..... | 39 |
| 6.5.2 | Evaluación de la de estabilidad térmica del β -caroteno encapsulado en la harina del perisperma (HP). | 45 |
| 7. | CONCLUSIONES | 51 |
| 8. | BIBLIOGRAFÍA | 53 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1 Espectro UV del licopeno en n-hexano..... | 27 |
| Figura 2 Espectro normalizado FT-IR de la harina del perisperma de la quinua. ... | 31 |
| Figura 3 Espectro FT-IR de la harina de perisperma de quinua entre la región de 900 y 1200 cm^{-1} | 34 |
| Figura 4 Espectro FT-IR de la harina de perisperma de quinua entre la región de 1400 y 1800 cm^{-1} | 35 |
| Figura 5 Espectro FT-IR de la harina de perisperma de quinua entre la región de 2800 y 3000 cm^{-1} | 35 |
| Figura 6 Perfil de viscosidad y flujo de la harina del perisperma | 37 |
| Figura 7 Comportamiento viscoelástico de la harina del perisperma..... | 38 |
| Figura 8 Contenido total de β -caroteno en las matrices de almidón de quinua en diferente composición y tratamiento. | 41 |
| Figura 9 Contenido porcentual de β -caroteno superficial y encapsulado en las fracciones de almidón de quinua de diferente composición y tratamiento | 42 |
| Figura 10 Índice de estabilidad del β -caroteno en fracciones de almidón de quinua de diferente composición y tratamiento. | 44 |
| Figura 11 Espectro de β -caroteno utilizado en el trabajo de investigación. | 45 |
| Figura 12 Comportamiento del β -caroteno superficial remanente en la fracción HP a diferentes temperaturas de almacenamiento durante 40 días. | 46 |
| Figura 13 Comportamiento del β -caroteno encapsulado remanente en la harina de perisperma (HP) a diferentes temperaturas de almacenamiento durante 40 días. | 47 |
| Figura 14 Índice de estabilidad del β -caroteno superficial remanente en la harina de perisperma a diferentes temperaturas de almacenamiento durante 40 días | 48 |
| Figura 15 Comportamiento del índice de estabilidad (III/II) del β -caroteno encapsulado remanente en la fracción FA a diferentes temperaturas de almacenamiento durante 45 días..... | 49 |

LISTA DE IMÁGENES

Pág.

Imagen 1 Grano de quinua pulido.....29

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1 Composición química del grano entero de quinua y sus harinas..... | 30 |
| Tabla 3 Intensidad relativa de las bandas características FT-IR en la harina del perisperma alminodosa, harina entera y harina del germen: | 32 |
| Tabla 4 Rendimiento de encapsulación del β -caroteno en diferentes matrices. | 43 |

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, existe una tendencia en el incremento de la producción del grano de quinua en el mundo, según datos reportados por la FAO, en el año 2017 la producción del grano de quinua alcanzó las 148.720 toneladas a nivel mundial. La quinua posee características intrínsecas tales como su amplia variedad genética, su capacidad de adaptabilidad, su calidad nutritiva y un buen balance de aminoácidos que es inusual en cereales lo cual les ha otorgado una denominación de proteínas de alta calidad¹, además existe el interés de la sociedad por consumir proteína de alta calidad y de origen vegetal², su bajo costo de producción y la diversidad de formas de utilización tradicional, no tradicional y de innovación en este producto. La industria de la quinua en el departamento del Cauca, presentó una producción ascendente de 1.413 toneladas al año en el 2018³ y en donde se vienen utilizando diferentes procesos de molienda, entre ellos la molienda seca que permite la producción de harinas con composiciones en base seca muy similares o menores a la del grano en cuanto al contenido de proteína y almidón⁴.

En este sentido, entre la empresa SEGALCO S.A.S. y la Universidad del Cauca se han unido y han adelantado tareas, en donde de manera conjunta se desarrolló un mecanismo para obtener harina hiperproteica de quinua mediante molienda

¹ JAMES, L. E. A. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): composition, chemistry, nutritional, and functional properties. *Advances in food and nutrition research*, 58, 2009, p. 1-31.

² BURRIEZA, H. P., *et al.* Shotgun proteomic analysis of quinoa seeds reveals novel lysine-rich seed storage globulins. *Food chemistry*, 293. 2019, p. 299-306.

³ SANTOS Martinez, T. L. Mercado potencial para la Quinua colombiana. 2020.

⁴ ROA Acosta, D. F. *Métodos de molienda seca y húmeda en molino planetario para la obtención y caracterización de fracciones de amaranto y su aplicación como agente encapsulante* (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales), 2015.

abrasiva a escala de laboratorio obteniendo fracciones de harina con un contenido de proteína hasta cuatro veces mayor que las harinas normales de quinua. Sin embargo, en este proceso de obtención de harinas hiperproteicas se genera un coproducto que no está siendo aprovechado en la industria y que posteriormente está creando problemas de manejo logístico por lo que se convierte en un residuo inaprovechable.

Para el presente trabajo de investigación, la problemática es la necesidad que tiene el grupo de investigación Cytbia y la empresa SEGALCO S.A.S. para caracterizar las propiedades fisicoquímicas y funcionalidad de encapsulación del coproducto de la molienda abrasiva de quinua con el fin de generar valor agregado de esta materia prima.

2. JUSTIFICACIÓN

En el departamento del Cauca se ha intensificado la producción de la quinua, un aspecto fundamental en el incremento del área sembrada fue la inversión de diferentes entidades interesadas en este pseudocereal, entre ellos la gobernación del Cauca, quien por medio del Sistema General de Regalías (SGR) ha invertido aproximadamente 14.000 millones de pesos⁵. Esta generosa inversión de recursos del SGR, creó condiciones propicias para dar valor agregado a la quinua, sin embargo no se conocían garantías de la continuidad de inversión a un largo plazo, como consecuencia restan la factibilidad para dar valor agregado a la quinua, por lo que se requiere que la empresa transformadora de quinua se mantenga y ascienda para satisfacer la demanda que día a día aumenta, así mismo aprovechar la riqueza nutricional que este pseudocereal nos ofrece y además satisfacer la oferta de semilla de los productores, quienes ya han ampliado sus extensiones del cultivo de quinua en el departamento.

La producción de grano de quinua asciende de manera significativa debido a la esperada ayuda gubernamental y a los subsidios generados a través de los proyectos generados a través del sistema de regalías, otra de las razones por la cual la producción del grano de quinua ha aumentado se debe al incremento de la demanda por parte de los consumidores los cuales han identificado el alto valor nutricional, así como sus propiedades funcionales que brinda este pseudocereal.

Lo anterior está permitiendo que se incremente la oferta de productos transformados a partir de la quinua, por lo tanto, surge la necesidad de obtener nuevos productos e innovadores. La empresa Seguridad Alimentaria de Occidente SEGALCO S.A.S, ha iniciado un trabajo conjunto con la Universidad del Cauca, para avanzar en la

⁵ GOBERNACIÓN DEL CAUCA. Quinua: Semilla de Desarrollo y crecimiento para el Cauca. (2019). <http://www.cauca.gov.co/noticias/quinua-semilla-de-desarrollo-y-crecimiento-para-el-cauca>.

generación de una plataforma tecnológica que dé lugar a un amplio espectro de productos innovadores y nutricionalmente valiosos a partir de un producto desarrollado en colaboración entre la empresa y la universidad. El producto obtenido es una harina hiperproteica en donde se obtiene en una muestra de 100 gramos de grano pulido que entran al proceso un 20% de harina hiperproteica y entre un 80% de coproducto producida a partir del desarrollo de una tecnología de molienda que permite fraccionar y separar la parte proteica del grano (germen) de la parte almidonosa (perisperma), aunque se han llevado a cabo varios estudios en la caracterización de esta harina hiperproteica por medio de tesis de investigación, todavía falta determinar algunas características fisicoquímicas, reológicas y tecnofuncionales de la fracción almidido-proteica que se genera como coproducto en la obtención de harinas hiperproteicas, es por este motivo que se plantea este tema de investigación en esta tesis.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar el coproducto de la molienda abrasiva del grano de quínoa determinando su aplicación como agente funcional.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las propiedades fisicoquímicas y reológicas del coproducto de la molienda abrasiva del grano de quínoa.
- Identificar una posible aplicación del coproducto de la molienda abrasiva del grano de quinua como agente funcional.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 LOCALIZACIÓN

El proyecto se llevará a cabo en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Cauca (Popayán), se hará uso de los laboratorios de reología y biotecnología con el fin de cumplir con el desarrollo de las pruebas necesarias para la caracterización del coproducto de la quinua.

4.2 MARCO TEÓRICO

4.2.1 Materia prima. La quinua se considera como un pseudocereal y ha sido usado desde aproximadamente 6000 años en países andinos⁶. Según el Ministerio de agricultura y desarrollo rural en Colombia para el 2016 las principales zonas productoras se concentran en los departamentos del Cauca, Nariño, Boyacá y Cundinamarca comercializándose en grano, harina, leche, coladas y snacks. Además, se considera que la quinua es uno de los granos más ricos en proteína, ya que contiene aminoácidos como la leucina, isoleucina, metionina, fenilalanina, treonina, triptófano y valina⁷.

Los granos de quinua presentan una importante cantidad de proteínas y compuestos bioactivos que lo posicionan como uno de los principales granos

⁶ CELY TORRES, L. A., & DUCÓN SALAS, J. C. Posibilidades en el comercio internacional de la quinua: un análisis desde la perspectiva de la competitividad. *Equidad y Desarrollo*, 1(24), 2015, p. 119-137.

⁷ QUINUA, F. A. O. Cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial (sitio en Internet). Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y alimentación. Oficina Regional para América Latina y el Caribe: Bolivia; 2011.

tradicionales como el trigo, maíz, arroz y avena puesto que supera su valor biológico⁸. Cabe resaltar que existen diversas variedades de quinua y dependiendo de ello se pueden encontrar diferentes composiciones de saponinas, que son un factor antinutricional, por lo tanto, es necesario eliminarlas por vía húmeda y métodos abrasivos⁹.

4.2.2 Molienda abrasiva. Es un método controlado que permite reducir al mínimo la ruptura de los granos mediante la eliminación de las capas externas. La molienda abrasiva en el grano de quinua, resulta ser un método eficaz que permite la eliminación de saponinas mediante el descascarillado del grano utilizando fresado y lavado, obteniendo además dos fracciones en el grano de quinua que son estructuralmente diferentes¹⁰.

4.2.3 Espectroscopia infrarroja. La espectroscopia infrarroja es una técnica de análisis para obtener información acerca de los procesos de absorción y emisión sobre las moléculas que se encuentran en la materia¹¹. La espectroscopia infrarroja es una técnica aplicada para analizar muestras de alimentos, utiliza regiones de infrarrojo que brinda información de los enlaces moleculares, detallando qué tipo de

⁸ ROJAS, W., *et al.* XII. Valor nutricional, agroindustrial y funcional de los granos andinos. *Granos Andinos*, 2010, p. 151.

⁹ ROA-Acosta, D. F., *et al.* Hyper-protein quinoa flour (*Chenopodium Quinoa Wild*): Monitoring and study of structural and rheological properties. *LWT*, 2020, p. 121, 108952.

¹⁰ CASTILLO, S. M., González, P. M. Desarrollo de un proceso tecnológico para obtener una harina hiperproteica de quinua, aplicable en la empresa SEGALCO S.A.S. Tesis de trabajo de grado en la modalidad de investigación. Universidad del Cauca, repositorio Universidad del Cauca. 2018.

¹¹ MARENCO, D. A. Espectroscopia infrarroja: una técnica alternativa para la identificación de microorganismos. *Ciencia y salud Virtual*, 4(1), 2012, p. 123-131.

moléculas están presentes en el alimento¹². Esta técnica se basa en la absorción producida cuando la frecuencia de vibración es igual a la frecuencia de la radiación infrarroja dirigida a la molécula, es decir que es una técnica espectroscópica vibracional¹³.

4.2.4 Principio de FTIR. La espectroscopia de infrarrojos por transformada de Fourier se ha desarrollado como una técnica o herramienta para la determinación simultánea y cuantitativa de componentes orgánicos, incluido el enlace químico, así como el contenido orgánico de proteínas, carbohidratos y lípidos en la región IR medio¹⁴. La espectroscopía FTIR suministra información de los fragmentos moleculares, la presencia o ausencia de grupos funcionales específicos y adicionalmente puede brindar una visión aún más profunda de la estructura de las fibras¹⁵.

4.2.5 Reología dinámica. Para la investigación y desarrollo de nuevos productos es importante el estudio de las propiedades reológicas y texturales del alimento, además permite el diseño de equipos, el control de calidad de materias primas, el

¹² TÉLLEZ MESA, C. Aplicaciones de la espectroscopía infrarroja en el análisis de alimentos. 2019.

¹³ COZZOLINO, D. Near infrared spectroscopy and food authenticity. In *Advances in Food Traceability Techniques and Technologies*. Woodhead Publishing. 2016, p. 119-136.

¹⁴ NANDIYANTO, A. B. D., OKTIANI, R., & RAGADHITA, R. How to read and interpret FTIR spectroscope of organic material. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 4(1), 2019, p. 97-118.

¹⁵ HOSPODAROVA, V., SINGOVSKA, E., & STEVULOVA, N. Characterization of cellulosic fibers by FTIR spectroscopy for their further implementation to building materials. *American journal of analytical chemistry*, 9(6), 2018, p. 303-310.

mejoramiento de procesos, productos intermedios y terminados¹⁶. Las propiedades reológicas se basan en las respuestas de flujo y deformación de los alimentos cuando se someten a esfuerzos normales y tangenciales¹⁷. Cuando el gránulo se hincha como consecuencia de la gelatinización del almidón en un medio acuoso, cambia las propiedades reológicas. La estructura final de alimentos con almidón depende de la fuente de almidón y la concentración el cual da como consecuencia una solución espesa o una estructura gelificada¹⁸.

4.2.6 Encapsulación. La encapsulación se puede definir como una técnica por la cual gotas líquidas, partículas sólidas o gaseosas, son cubiertas con una película polimérica porosa conteniendo una sustancia activa¹⁹. La composición del material de la pared es un elemento principal y dependiendo de ello refleja la eficiencia y estabilidad de la encapsulación durante su almacenamiento, sin embargo, existen materiales de encapsulación que no cuentan con las propiedades necesarias y por lo tanto se realizan modificaciones químicas para mejorar su actividad física²⁰.

¹⁶ GÓMEZ FARFÁN, L. L. Evaluación del comportamiento reológico de harina de trigo empleando concentrado proteico de Kiwicha (*Amaranthus Caudatus*) como mejorador, para su aplicación en la elaboración de producto de panificación–Lambayeque 2015. 2017.

¹⁷ CHOQUEHUAYTA HUAMANSAYRE, D. H. Análisis reológico de harinas y almidones aislados de cinco variedades de quinua (*Chenopodium quinoa Willd*) para su utilización en la elaboración de mazamorra. 2017.

¹⁸ CUI, S. W. (Ed.). Food carbohydrates: chemistry, physical properties, and applications. CRC press. 2005.

¹⁹ ARANEDA, C., & VALENZUELA, F. Microencapsulación de extractantes: una metodología alternativa de extracción de metales. *Revista Ciencia Ahora*, 22(11), 2009, p. 9-19.

²⁰ RIOS AGUIRRE, S., & GIL GARZÓN, M. A. Microencapsulación por secado por aspersión de compuestos bioactivos en diversas matrices: una revisión. *TecnoLógicas*, 24(51), e1836-e1836. 2021.

4.2.7 Agentes encapsulantes. En esta técnica se emplean polisacáridos, los cuales se destacan el almidón, maltodextrina, jarabe de maíz, goma arábica, agar, fibras y carbometilcelulosa, lípidos como ácido esteárico, mono y diglicéridos y lecitinas y proteínas como la gelatina, caseína, lactosuero, soya, trigo²¹. Cuando se emplean las microcápsulas, permiten que los materiales alimenticios empleados resistan las diferentes condiciones de procesamiento y empaque permitiendo finalmente mejorar el sabor, el aroma, la estabilidad, el valor nutritivo y la apariencia de sus productos²². En el sector alimenticio dentro de los hidrocoloidales mayormente usados por sus buenas propiedades de emulsificación, formación de películas, solubilidad de agua y biodegradabilidad son las gelatinas²³.

4.3 MARCO HISTÓRICO

Según el informe técnico “La quinua, cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial” elaborado por PROINPAL, la quinua ha sido descrita por primera vez en sus aspectos botánicos por Willdenow en 1778, como una especie nativa de Sudamérica, y además se muestra como un gran potencial para aportar a la seguridad alimentaria en diferentes regiones del planeta, especialmente en aquellos países donde la población no tiene acceso a fuentes de proteína o donde las condiciones de producción son limitadas por la escasa humedad, la baja disponibilidad de insumos y la aridez. La quinua fue catalogada en 1996 por la FAO como uno de los cultivos promisorios de la humanidad, debido a sus grandes

²¹ PARRA, H, R. Revisión: microencapsulación de alimentos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 2010, vol. 63, no 2, p. 5669-5684.

²² MONTES, E, J., DE PAULA, C, D., ORTEGA, F. Determinación de las condiciones óptimas de encapsulamiento por co-cristalización de jugo de maracuyá (*Passiflora edulis*). *Temas agrarios*, 2007, vol. 12, no 1, p. 5-12.

²³ SU, YL, *et al.* Microencapsulación de nanopartículas de *Radix salvia miltiorrhiza* mediante secado por aspersión. *Tecnología de polvo*, 2008, vol. 184, nº 1, pág. 114-121.

propiedades benéficas y por sus múltiples usos, sino también por considerarla como una alternativa para solucionar los graves problemas de nutrición humana²⁴.

Se evaluó el efecto de tiempo de escaldado sobre las propiedades tecno funcionales como capacidad de retención de agua, capacidad de retención de aceite, capacidad de hinchamiento, contenido de fenoles totales, contenido de flavonoides totales y actividad antioxidante en harinas obtenidas a partir de tres tipos de quínoa (*Chenopodium quinoa willd*) blanca, negra y roja sobre la degradación de sus propiedades tras el aumento del tiempo de cocción²⁵.

Evaluaron el efecto de dos procedimientos de aislamiento de proteínas de la harina integral de quinua (variedad INIAP *Tunkahuan*) sobre las propiedades funcionales de los aislados proteicos de esta y se determinó efectos sobre sus propiedades reológicas como viscosidad²⁶.

Estudió las propiedades fisicoquímicas y funcionales de las proteínas de quinua a partir de un aislado proteico obtenido de la harina desgrasada comercial. Las proteínas de quinua obtenidas mantuvieron parte de su estructura nativa y resultaron solubles a pH alcalinos²⁷.

²⁴ QUINUA, F. A. O. Cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial (sitio en Internet). Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y alimentación. Oficina Regional para América Latina y el Caribe: Bolivia; 2011.

²⁵ ALBADALEJO Tomás, E. Efecto del tiempo de escaldado sobre las propiedades tecnofuncionales y antioxidantes de las harinas obtenidas a partir de tres tipos de quínoa (*Chenopodium quinoa Willd*). 2019.

²⁶ LOZANO, R., TAPIA, I. L., & TACO, V. J. Evaluación de las propiedades funcionales del aislado proteico de quinua (*Chenopodium qui-noa Willd*) variedad INIAP-TUNKAHUAN con potencial uso en la nutrición humana. *Revista de la Facultad de Ciencias Médicas (Quito)*, 44(1), 2019, p. 48-56.

²⁷ MONTELLANO DURAN, N. Propiedades estructurales y funcionales de las proteínas de *Chenopodium quinoa* y sus hidrolizados. 2018.

Realizaron un seguimiento de la molienda abrasiva del grano de amaranto para la obtención de dos fracciones con potencial industrial, proponen dicho proceso para la obtención de dos fracciones con diferente composición química con el fin de ampliar los usos industriales a este grano andino²⁸.

Evaluó el efecto de la sustitución de harina de trigo con harina de quínoa (*Chenopodium quinoa*) sobre las propiedades reológicas de la masa y texturales del pan donde se realizó un análisis químico, capacidad de retención de agua y significativos cambios de perfil de viscosidad²⁹.

Se determinó el efecto de la molienda abrasiva y el tratamiento térmico sobre las propiedades reológicas de harinas de quinua. Se determinó que la molienda abrasiva era apropiada para obtener harinas del germen y del perisperma³⁰.

²⁸ ACOSTA, D. F., CALLEJAS, C. G., & YONDA, Y. C. Seguimiento de la molienda abrasiva del grano de amaranto para la obtención de dos fracciones con potencial industrial. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial: BSAA*, 15(1), 2017, p. 59-66.

²⁹ VASQUEZ-Lara, F. *et al.* Efecto de la sustitución de harina de trigo con harina de quínoa (*Chenopodium quinoa*) sobre las propiedades reológicas de la masa y texturales del pan. *Revista iberoamericana de tecnología postcosecha*, 17(2), 2016, p. 307-317.

³⁰ POLO, María P.; ROA, Diego F.; BRAVO, Jesús E. Propiedades reológicas de quinua (*Chenopodium quinoa* Wild) obtenidas mediante molienda abrasiva y tratamiento térmico. *Información tecnológica*, 2021, vol. 32, no 6, p. 53-64.

5. METODOLOGÍA

5.1 MATERIAL

Se utilizaron granos de quinua (10,5 % b.s.) previamente seleccionados y tamizados, de la variedad Tunkahuano, de Bolívar, Cauca en Colombia. El grano fue proporcionado por la empresa SEGALCO S.A.S.

5.2 MÉTODOS

5.2.1 Obtención de harina de quinua por molienda abrasiva. Se utilizó un prototipo de molino desarrollado dentro de la empresa Segalco S.A (Mavimar, Popayán, Colombia), el cual separó simultáneamente el germen del perisperma almidonoso en flujo continuo. Los coproductos obtenidos fueron una harina hiperproteica (34 % proteína, 18 % de grasa) y un grano pulido (12.4 % proteína, 5.5 % grasa, 83.8 carbohidratos totales y fibra 0.8 % de quinua). Este grano fue molido para la obtención de la harina la cual pasó por un tamiz de 250 micras de abertura, la harina obtenida con menor granulometría fue empleada para los diferentes análisis de caracterización en este trabajo de investigación.

5.2.2 Molienda húmeda tradicional de control. Se realizó el procedimiento de aislado de almidón de quinua por medio del procedimiento de molienda húmeda alcalina desarrollado por Calzetta y col, (2006). Los granos fueron remojados en una solución de NaOH (0,25 % p/v) durante 24 horas a 25 °C (Sigma Chemical Co, San Luis, Estados Unidos de América). Se mantuvo una relación de solución/grano de 3 mililitros por gramo. Posteriormente los granos humectados fueron licuados y se obtuvo una lechada, la cual fue pasada por una serie de tamices y el residual

que quedo en el fondo del tamiz se llevó a centrifugación a 1800g. Después de la centrifugación se formaron dos fases, la capa superior fue un mucilago compuesto principalmente de proteína y almidón, mientras que el sedimento estaba compuesto de almidón. Se llevó a cabo el procedimiento de liofilización como método de secado del almidón aislado durante 24 horas. Posteriormente el almidón seco fue procesado en un molino de cuchillas y se almaceno en bolsas de polipropileno a una temperatura de 5° hasta su uso.

5.2.3 Espectroscopia infrarroja de rango medio por ATR. Esta técnica nos permitió determinar los diferentes grupos químicos funcionales los cuales tienen relación directa con las macromoléculas de interés alimentario, por ejemplo, el grupo químico amino (NH_2) está asociado a macromoléculas proteicas como lo menciona Cardona³¹, otro ejemplo es el enlace glucosídico (C-O-C) asociado a la macromolécula del almidón como lo menciona en su investigación Granda³². Por consiguiente, es una técnica que se ajusta para el estudio composicional en las harinas. Los espectros de FTIR se registraron en un espectrómetro IRAFFINITY-1S (Shimadzu Corp., Kyoto, Japón) equipado con el software LabSolutions IR (Shimadzu Corp., Kyoto, Japón). Para el análisis del espectro se utilizó el modo de reflexión entre 600 cm^{-1} y 4000 cm^{-1} . Cada sistema se midió por triplicado a $25\text{ }^\circ\text{C}$. El análisis espectral se realizó utilizando OriginPro versión 2019b. Los espectros fueron corregidos y normalizados (entre 0 y 1) relacionando el pico de transmitancia más alto.

³¹ CARDONA SERRATE, F. Proteínas y aminoácidos en alimentos. Propiedades físico-químicas y funcionales.

³² GRANDA RUEDA, M.D. Polímeros a base de almidón como sustitutos de los plásticos de un solo uso. [Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación presentado como requisito previo a la obtención del Título de Química].UCE. 2021.

5.2.4 Propiedades de flujo. A través de un reómetro (TA INSTRUMENTS, AR 1500, New Castel, EE. UU.), el cual está equipado con una geometría de cilindro concéntrico se determinaron las propiedades de flujo de cada dispersión. Se realizó un incremento de 0 a 300 s⁻¹ durante 5 minutos para la velocidad de cizallamiento. Se determinó la viscosidad aparente media entre 180 y 200 s⁻¹, evitando la zona de transición por efecto de la velocidad de corte. Como resultado se obtuvieron curvas de flujo (esfuerzo cortante versus velocidad de corte) y se ajustaron al modelo de ley de potencia **Eq. (1)**.

$$\tau = K^*(Y)^n \quad (1)$$

Donde τ es el esfuerzo cortante (Pa), K es el coeficiente de consistencia (Pa.s⁻¹), Y es la velocidad de corte (s⁻¹) y n es el índice de comportamiento del flujo. El índice de comportamiento de flujo indica un comportamiento de flujo newtoniano ($n = 1$), de adelgazamiento por cizallamiento (pseudoplástico, $n < 1$) y de espesamiento por cizallamiento (dilatante, $n > 1$). Para establecer el efecto del procesamiento térmico sobre estos parámetros, la consistencia y la fluencia se determinaron antes y después de la curva de empastamiento. Finalmente, los datos fueron suavizados empleando la función de Savitsky-Golay en el programa GraphPad Prism versión 8³³.

5.2.5 Perfil de viscosidad. Mediante un reómetro (TA INSTRUMENTS, AR 1500, New Castel, EE. UU.), equipado con una geometría de cilindro concéntrico se determinaron las propiedades reológicas de cada dispersión. La velocidad de cizalla se mantuvo constante a 16,75 s⁻¹, en todo el rango de calentamiento (25 °C - 95°C - 25°C) mientras que la velocidad de calentamiento fue de 10 °C/min. El pico de

³³ POLO, María P.; ROA, Diego F.; BRAVO, Jesús E. Propiedades reológicas de quinua (*Chenopodium quinoa* Wild) obtenidas mediante molienda abrasiva y tratamiento térmico. *Información tecnológica*, 2021, vol. 32, no 6, p. 53-64.

viscosidad (PV), la caída de viscosidad (BD) y set back (SB) se realizaron por duplicado. Finalmente, se suavizaron los datos en el programa GraphPad Prism versión 8 mediante la función de Savistky-Golay³⁴.

5.2.6 Comportamiento viscoelástico. Según lo descrito por Lopez, Yesika B., Roa, Diego F., & Bravo, Jesús E. (2022), las propiedades viscoelásticas de las muestras se establecieron con algunas modificaciones y se analizaron utilizando un reómetro (TA INSTRUMENTS, AR 1500, New Castel, EE. UU.) con un sistema de placa Peltier con control de temperatura y una geometría de placa paralela lisa de 40 mm de diámetro. Se cargaron aproximadamente 2 g de dispersión sobre la placa inferior y la placa superior se bajó a un espacio de 1 mm. Se limpió el exceso de dispersión y se eliminó del borde exterior de la geometría de la placa superior. Después, se agregó aceite de parafina al borde exterior de la dispersión para prevenir que durante la medición el agua evapore. La velocidad de calentamiento fue de 10 °C/min a 1 Hz y 0,01% de deformación. Los módulos elásticos y viscosos (G' y G'') fueron determinados, respectivamente³⁵.

5.2.7 Estabilidad de gel. Utilizando el termostato marca polystat, se sometieron las harinas a un proceso de gelificación en un exceso de agua empleando una relación (3:1) a 90°C durante 40 minutos, una vez formado el gel se almacenaron a 5°C por 24 horas. Las propiedades viscoelásticas de los geles se estudiaron según lo descrito por López, Roa, & Bravo, con algunos cambios y se evaluaron en un Reómetro (TA INSTRUMENTS, AR 1500, New Castel, EE. UU.) utilizando geometría de placas paralelas en modo de rotación con tensión controlada. Se realizó un barrido de amplitud (1% a 100%) a 25°C y frecuencia angular de 5 Hz,

³⁴ GRANADA, Op. Cit.

³⁵ LOPEZ, Yesika B.; ROA, Diego F. y BRAVO, Jesús E. Efecto del tratamiento térmico en la estabilidad de geles obtenidos a partir de harinas de quinua. Información tecnológica, 2022, vol. 33, no 1, p. 203-214.

para formar la región viscoelástica lineal (LVR). Los barridos de frecuencia se realizaron a una deformación del 5%, variando la frecuencia de 0.1 a 100 Hz, se establecieron los módulos elástico y viscoso (G' y G''), respectivamente. Lo anterior sirve de base para identificar el potencial gel de las harinas. Se utilizó el modelo de Ross-Murphy para determinar la naturaleza del gel mediante el cual es posible establecer si un gel es fuerte o débil.

$$\text{Log}(G') = \text{Log}(K) + n * \text{Log}(\omega) \quad (1)$$

Donde, K y n son los parámetros para determinar. El valor (n) se considera un indicador de la naturaleza viscoelástica de los geles, si n tiende a cero significa que los geles tienen tendencia a ser puramente elásticos, por el contrario, cuando n comienza a aumentar o tiende a 2, presenta un aumento en la contribución del componente viscoso³⁶.

5.2.8 Capacidad encapsulante del coproducto de la molienda de quinua. Con el fin de determinar la mejor eficiencia encapsulante se prepararon 3 sistemas de diferente composición y tratamiento, las cuales se definieron de la siguiente manera:

1. Emulsión formada por el coproducto de la quinua (HP).
2. Emulsión formada por el almidón de la quinua (QA).
3. Emulsión formada por el almidón de la quinua más gelatina (QA-Ge).

5.2.9 Preparación de las emulsiones con β -caroteno. Se prepararon 1,65 g de almidón de quinua más 0,11 g de aceite de canola- β -caroteno más 0,248 g de gelatina, con el fin de mantener la concentración de proteína y grasas similares a las concentraciones en 2 g de la harina del perisperma. Luego se agregó agua

³⁶ POLO, Op Cit., p. 53-64

destilada hasta completar una dispersión al 5 %, posteriormente se calentó hasta 95 °C por 20 min en baño termostático, esto con el fin de provocar la gelatinización total del almidón y la desnaturalización parcial de la proteína. Luego las dispersiones fueron enfriadas hasta 25 °C y se les adiciono 40 miligramos de una solución de β -caroteno en canola- β -caroteno. Con el fin de homogeneizar la muestra, las emulsiones se trataron en un equipo ultra turrax T18B a 15.000 rpm por un tiempo de 5 min.

5.2.10 Liofilización de las muestras. Cada emulsión se transfirió a viales de 5 mL y se les aplicó nitrógeno líquido con el fin de estabilizar el sistema coloidal. Posteriormente, las emulsiones congeladas fueron transferidas a un liofilizador Laboquest MFDQ-1000 (Westchester, USA), manteniéndose a una temperatura de -50 °C y luego se realizó el secado por un tiempo de 24 horas.

5.2.11 Extracción del β -caroteno superficial y encapsulado. Se adicionó 3 mL de hexano a cada vial que contenía la emulsión liofilizada y posteriormente se agitó durante 8 minutos para separar la matriz sólida de la pared del recipiente. El tiempo de extracción se estableció con base a la metodología Roa³⁷. Se tomó una alícuota del extracto y se determinó el β -caroteno superficial mediante espectrofotometría UV/Vis. Se descarta la solución de hexano restante y la fracción sólida restante se sometió de nuevo a un lavado con 3 mL de hexano. Seguidamente se adicionó 1,5 mL de agua destilada a la fracción sólida que se encuentra libre de β -caroteno superficial y para la liberación del β -caroteno encapsulado se solubilizó la fracción mediante agitación durante 5 minutos. Después, para lograr extraer β -caroteno libre se adicionó 3 mL hexano, y finalmente se realizó la determinación mediante

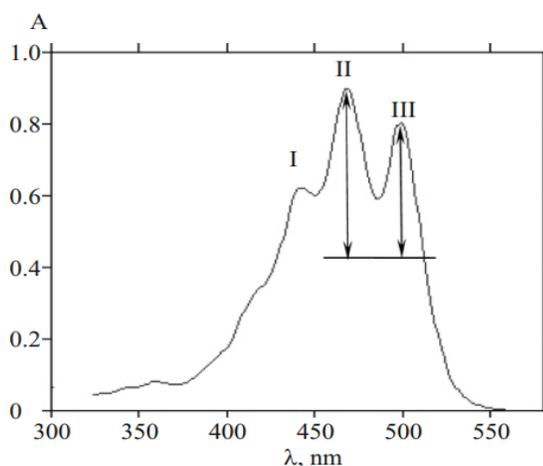
³⁷ ROA ACOSTA, D. F. *Métodos de molienda seca y húmeda en molino planetario para la obtención y caracterización de fracciones de amaranto y su aplicación como agente encapsulante* (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales). 2015.

espectrofotometría UV/Vis; la lectura en el espectrofotómetro se realizó entre 200 a 800 nm.

5.2.12 Determinación de los carotenos mediante espectroscopia de UV-VIS.

Los carotenoides se caracterizan por tener un sistema de doble enlace conjugado largo y por lo tanto la absorción de luz se encuentra en un rango entre 400-500 nm³⁸. Los máximos picos de absorción comúnmente se denotan con números romanos (I, II, III) como lo muestra la figura 8 de manera de ejemplo.

Figura 1 Espectro UV del licopeno en n-hexano



Fuente: Tomado de *Structure of chemical compounds, methods of analysis and process control* (p. 2), por Finkel'shtein, 2016, *Pharmaceutical Chemistry Journal*.

Se determinó el índice III/II % el cual es la relación de las absorbancias a dos picos máximos (III y II). Esta notación tiene en cuenta la relación de la altura del pico de absorción de mayor absorbancia, designado III, y el pico de absorción de mayor

³⁸ ZAGHDOUDI, K., NGOMO, O., VANDERESSE, R., ARNOUX, P., MYRZAKHMETOV, B., FROCHOT, C., & GUIAVARC'H, Y. Extraction, Identification and Photo-Physical Characterization of Persimmon (*Diospyros kaki* L.) Carotenoids. *Foods*, 6(1), 4. 2017.

pico, designado II, teniendo el mínimo entre los dos picos como la línea de base, multiplicado por 100³⁹.

5.2.12 Comportamiento del β -caroteno superficial y encapsulado de la matriz sólida expuesta a dos temperaturas. Los viales fueron sometidos a 5 °C y 25 °C durante 40 días, para determinar la disminución de β -caroteno en el tiempo y en función de la temperatura, la determinación se realizó de acuerdo a la metodología realizada por Roa⁴⁰.

5.2.13 Análisis estadístico. El análisis estadístico fue evaluado por medio de ANOVA. Para determinar las diferencias entre tratamientos se usó la prueba de Tukey, usando el programa Graphpad Prims 8 (GraphPad Software, Inc., San Diego, CA, USA). En algunos casos, el *valor-p* fue calculado usando t-test para un análisis más profundo.

³⁹ ROA, Diego F., et al. Encapsulation and stabilization of β -carotene in amaranth matrices obtained by dry and wet assisted ball milling. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, vol. 10, no 3, p. 512-521.

⁴⁰ ROA ACOSTA, D. F. *Métodos de molienda seca y húmeda en molino planetario para la obtención y caracterización de fracciones de amaranto y su aplicación como agente encapsulante* (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales). 2015..

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se llevó a cabo el proceso de molienda abrasiva para la obtención de una harina de quinua como lo muestra la imagen 1, en donde se obtuvo harina hiperproteica y el coproducto del perisperma almidonoso. Se realizaron los análisis establecidos dentro de la metodología para la caracterización del coproducto.

Imagen 1 Grano de quinua pulido.



FUENTE: propia (2021)

El proceso de molienda es una operación que permite obtener diferentes tipos de harinas desde el punto de vista granulométrico y funcional. Por esta razón en esta investigación abordaremos los cambios en las propiedades físicas, funcionales y estructurales que se generan en las fracciones de molienda obtenidas dentro del rango experimental establecido.

6.1 CONTENIDO DE LÍPIDOS, PROTEÍNA Y CARBOHIDRATOS DE LAS HARINAS OBTENIDAS POR MOLIENDA ABRASIVA.

En la tabla 1 puede observarse respecto al grano entero un incremento del 20 % en el contenido de carbohidratos en la Harina del Perisperma (HP), mientras que el

contenido de proteínas y lípidos disminuyó un 28,7 % y 36,7 % respectivamente. Por otra parte, tanto el contenido de lípidos y proteínas se duplica en la harina del germen (HG) con respecto del grano entero, mientras el contenido de carbohidratos se disminuye a la mitad.

Es importante destacar que los niveles de enriquecimiento en las harinas HP y HG de esta investigación fueron similares a los obtenidos por Acosta, Callejas y Calderon⁴¹ quienes investigaron los efectos de las condiciones de molienda abrasiva sobre el contenido de proteína, el índice de área aparente y los parámetros de color de la fracción almidonosa, obteniendo la formación de fracciones almidonosa y lipoproteica en el grano de amaranto. La harina del perisperma fue procesada en un molino analítico durante 2 minutos, con el objetivo de obtener una harina más fina.

Tabla 1 Composición química del grano entero de quinua y sus harinas.

| Fracción del grano | Lípidos (%) | Proteínas (%) | Carbohidratos (%) |
|-----------------------|-------------|---------------|-------------------|
| Grano entero | 8,7 | 17,4 | 66,6 |
| Harina del perisperma | 5,5 | 12,4 | 83,8 |
| Harina del germen | 19,0 | 34,0 | 33,2 |

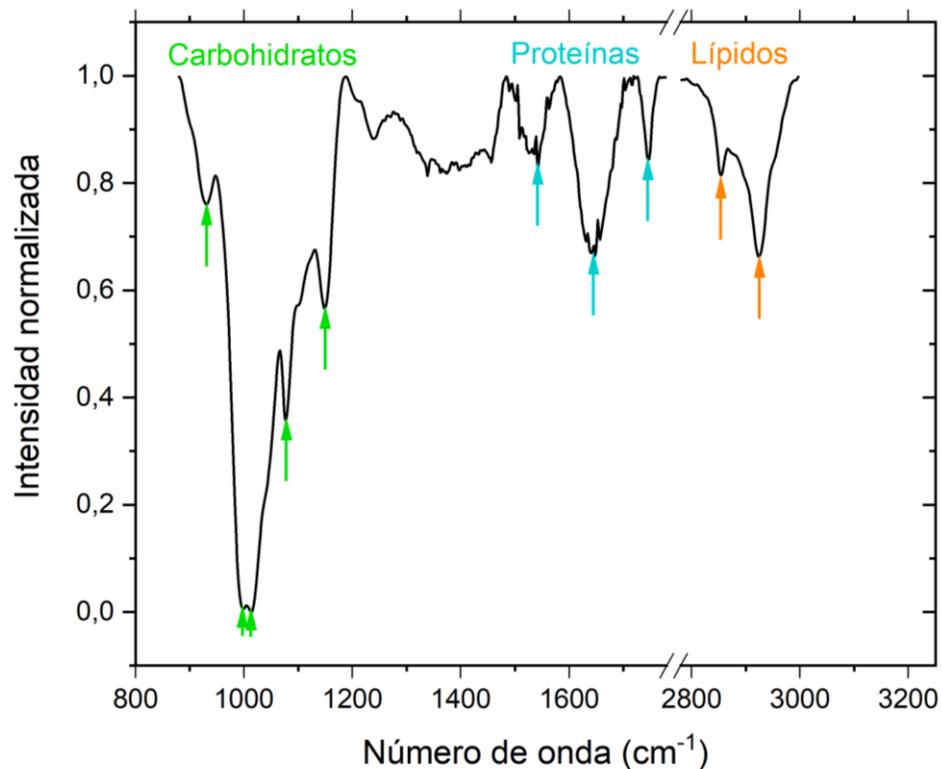
Fuente: Empresa SEGALCO S.A.S

⁴¹ ACOSTA, D. F., CALLEJAS, C. G., & YONDA, Y. C. Seguimiento de la molienda abrasiva del grano de amaranto para la obtención de dos fracciones con potencial industrial. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial: BSAA*, 15(1), 2017, p. 59-66.

6.2 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA DE RANGO MEDIO POR ATR.

Se identificaron 3 áreas para el análisis de carbohidratos, proteínas y lípidos como lo muestra la figura 2 que representa el espectro total normalizado.

Figura 2 Espectro normalizado FT-IR de la harina del perisperma de la quinua.



Los espectros fueron corregidos y normalizados (entre 0 y 1) para la presentación de la figura, relacionando el pico de transmitancia más alto. Se compararon la intensidad de cada banda entre las diferentes harinas. Las diferentes letras expresan diferencias significativas (Valor $P < 0,05$) el análisis se realizó asumiendo normalidad de datos por medio de ANOVA y asumiendo datos no paramétricos por medio de t-test.

Tabla 2 Intensidad relativa de las bandas características FT-IR en la harina del perisperma alminodosa, harina entera y harina del germen:

| Banda | Harina de perisperma alminodosa | | Harina entera | | Harina del germen | |
|--|---------------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| | Número de onda (cm-1) | Intensidad | Número de onda (cm-1) | Intensidad | Número de onda (cm-1) | Intensidad |
| Banda de grupos funcionales (C-O-H; C-O-C) asociada a carbohidratos | 931 | 0,237 ± 0,001 ^a | 930 | 0,199 ± 0,001 ^c | 934 | 0,232 ± 0,001 ^b |
| | 999 | 0,990 ± 0,002 ^a | 1003 | 0,981 ± 0,002 ^b | 999 | 0,881 ± 0,002 ^c |
| | 1015 | 0,999 ± 0,001 ^a | 1013 | 0,991 ± 0,01 ^a | 1018 | 0,917 ± 0,001 ^b |
| | 1076 | 0,640 ± 0,004 ^b | 1076 | 0,632 ± 0,004 ^c | 1074 | 0,660 ± 0,004 ^a |
| | 1150 | 0,430 ± 0,002 ^a | 1150 | 0,425 ± 0,002 ^b | 1144 | 0,349 ± 0,002 ^c |
| Banda asociada a grupos funcionales (N-H; C-N; C=O) asociado a proteínas | 1543 | 0,167 ± 0,002 ^c | 1543 | 0,173 ± 0,002 ^b | 1539 | 0,372 ± 0,004 ^a |
| | 1644 | 0,354 ± 0,008 ^c | 1645 | 0,397 ± 0,009 ^b | 1636 | 0,749 ± 0,02 ^a |
| | 1746 | 0,186 ± 0,006 ^b | 1746 | 0,087 ± 0,003 ^c | 1744 | 0,255 ± 0,008 ^a |
| Banda asociada a grupos funcionales (C-H) asociado a lípidos | 2855 | 0,195 ± 0,002 ^b | 2852 | 0,089 ± 0,001 ^c | 2855 | 0,219 ± 0,002 ^a |
| | 2924 | 0,351 ± 0,003 ^b | 2926 | 0,194 ± 0,002 ^c | 2924 | 0,365 ± 0,003 ^a |

Las diferentes letras representan diferencias significativas en cada número de onda ($p < 0.05$)

A través del análisis de la intensidad relativa de las bandas características FT-IR en las harinas de la tabla 2, se encuentran que las bandas asociadas a los grupos funcionales (C-O-H;C-O-C) están ligadas a los carbohidratos y que como consecuencia del tratamiento empleado para la obtención de una harina hiperproteica, su coproducto resultante (harina del perisperma alminodoso) presenta una mayor intensidad para estos grupos funcionales que están atribuidas primordialmente a vibraciones de los enlaces glucosídicos, además muestra diferencias significativas al compararlas con las otras muestras de harinas.

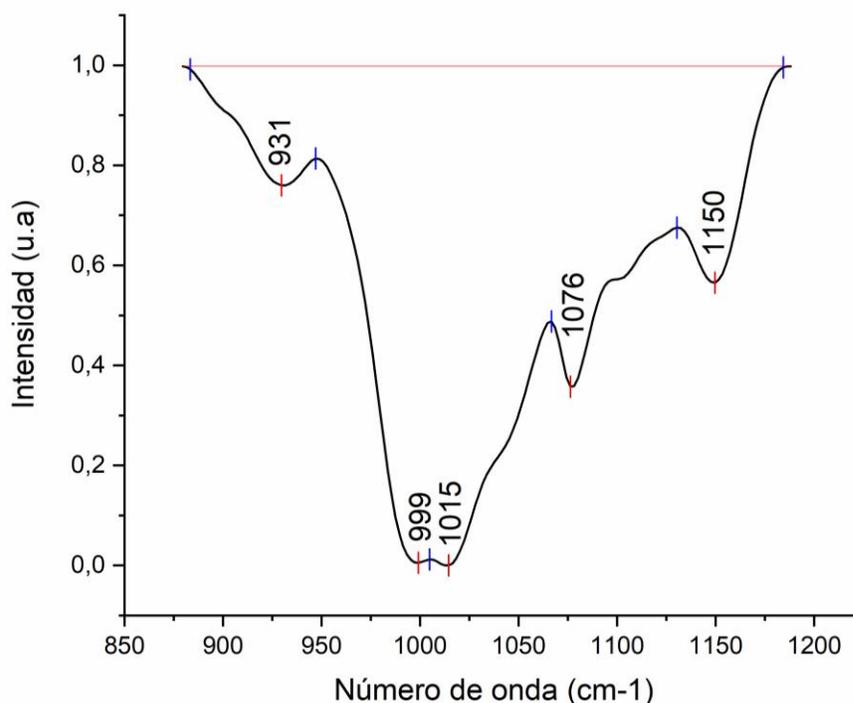
Por otra parte, las bandas asociadas a grupos funcionales (N-H;C-N;C=O) enlazadas a las proteínas, la harina del germen resulta con un mayor contenido de proteína según nos indica el mayor número en sus intensidades de las bandas, mientras que la harina del perisperma almidonoso presenta una disminución significativa de estos grupos funcionales asociados a las proteínas. Finalmente, la harina del germen a pesar de ser sometida a procesos de desengrasado se evidencia que para las bandas que están asociadas a los lípidos presentan una intensidad mayor, es decir, que no se alcanza a retirar completamente su contenido de grasa.

Mediante las pruebas de FTIR se logró generar un espectro el cual mide las vibraciones de los enlaces dentro de los grupos funcionales. Los espectros que se reflejan en regiones $< 1200 \text{ cm}^{-1}$ crean un patrón complejo y único utilizado para identificar o comparar muestras (región dactilar)⁴². El espectro de la figura 3 nos indica los picos con mayor intensidad en 931 cm^{-1} relacionada a la vibración del enlace glucosídico α 1-4 (C-O-C) mientras que los picos 999 y 1015 cm^{-1} corresponde a C(1)-H Flexión. Finalmente, al pico 1076 cm^{-1} se le atribuye a la banda de C-O-H flexión y para el pico 1150 cm^{-1} se relaciona con C-O, C-C estiramiento⁴³.

⁴² KUHNNEN, Shirley, et al. ATR-FTIR spectroscopy and chemometric analysis applied to discrimination of landrace maize flours produced in southern Brazil. *International journal of food science & technology*, 2010, vol. 45, no 8, p. 1673-1681.

⁴³ BUSTOS, Claudio Raúl Bernal, et al. Quinoa, *Chenopodium quinoa* (Willd.) en Colombia Caracterización de granulos de almidón nativo de quinua por IR-ATR, MEB, DRX. *Revista de Investigación*, 2015, vol. 8, no 2, p. 122-131.

Figura 3 Espectro FT-IR de la harina de perisperma de quinua entre la región de 900 y 1200 cm^{-1}



Después de analizar figura 4, se obtiene un pico de 1543 cm^{-1} y se asocia con las vibraciones de bandeo del enlace N-H que corresponde a un 60 % y a un estiramiento del enlace C-N en un 40 %⁴⁴. Los picos que se manifiestan en el espectro en una región entre 1641 y 1645 cm^{-1} se atribuye el estiramiento H-O-H⁴⁵ y se puede relacionar con el pico obtenido en esta investigación que fue de 1644 cm^{-1} . El estiramiento de los enlaces o mejor de las estructuras secundarias de las proteínas puede estar relacionado principalmente a estructuras β -sheet⁴⁶, por lo tanto, es posible que, si hay un incremento en estas estructuras beta, la proteína sea más flexible y tenga una aptitud a formar masas y geles más elásticos. El

⁴⁴ ORSINI, S. M. D., & APARICIO, G. P. P. Espectroscopia De Infrarrojo Con Transformada De Fourier (FT-IR) para análisis de muestras de harina de trigo, fécula de maíz y almidón de yuca. @ *limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 19(1). 2021, p. 5-16.

⁴⁵ Ibid.

⁴⁶ ABARCA GARCÍA, Freddy Giovanni, et al. Estudio de las propiedades fisicoquímicas y reológicas de suspensiones de gluten de trigo a partir de un solvente binario para la obtención de nanopartículas por electroaspersión. Tesis de Maestría, Universidad de Sonora. Sonora, 2022.

siguiente pico alcanzado de 1746 cm^{-1} se encuentra cercano al mencionado por Ramos en donde se le atribuye a la banda 1745 cm^{-1} al estiramiento de C-O⁴⁷.

Figura 4 Espectro FT-IR de la harina de perisperma de quinua entre la región de 1400 y 1800 cm^{-1}

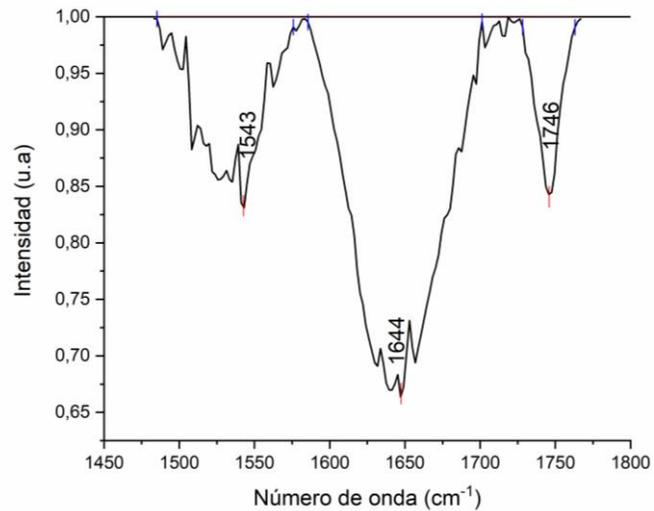
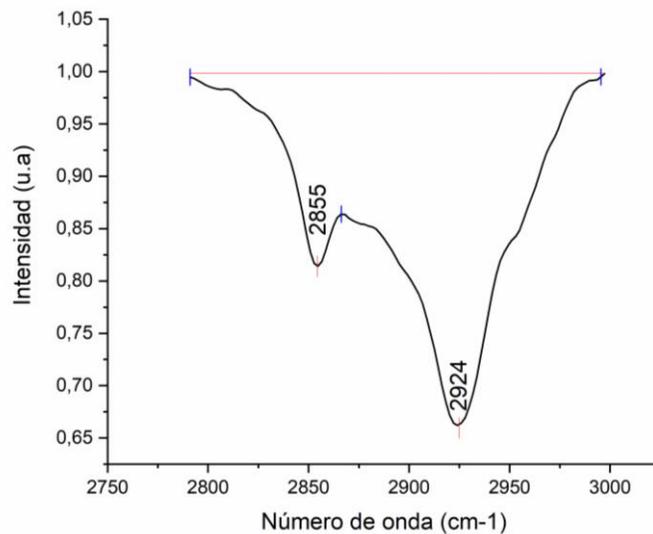


Figura 5 Espectro FT-IR de la harina de perisperma de quinua entre la región de 2800 y 3000 cm^{-1}



⁴⁷ RAMOS, D, S., CÁRDENAS, J. DE D, F., & MEDINA, J. J. Viscoelastic behaviour of masa from corn flours obtained by nixtamalization with different calcium sources. Food Chemistry. 2018, vol. 248, p. 21-28.

Según Miller y Dumas, las regiones lipídicas se localizan entre 3000-2800 cm^{-1} ⁴⁸, la figura 5 muestra la región de lípidos en donde sus máximos picos se obtienen en 2855 y 2924 cm^{-1} , haciendo comparación con lo que indica la bibliografía se puede mencionar que corresponde al estiramiento simétrico de los enlaces C-H de CH_2 .

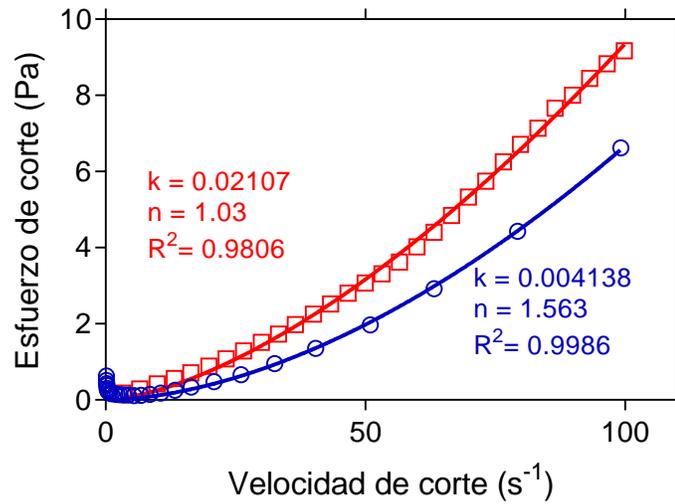
6.3 PROPIEDADES DE FLUJO Y VISCOSIDAD

Se determinó las propiedades de flujo a la harina del perisperma hasta una velocidad de corte de 100 s^{-1} antes y después del calentamiento, según la metodología de Polo et al., 2021⁴⁹. Antes del calentamiento la harina del perisperma mostró un comportamiento similar a la de los almidones, es decir que tiene un comportamiento dilatante ósea aumenta su viscosidad con el incremento de la velocidad de corte. Esto también se puede observar al modelar los datos por medio de la ecuación de la potencia, donde el índice N es mayor a cero (1.563), además mostró una baja consistencia con un índice K de 0,0041, este resultado se debe a que el almidón es poco soluble al agua a temperatura ambiente. Sin embargo, al someter la harina del perisperma a un calentamiento que simule un proceso de cocción, se observó un aumento significativo de la consistencia K (0,021) y un cambio en el comportamiento reológico de flujo, este cambio es a fluido newtoniano (con un índice n que tiende a 1).

⁴⁸ MILLER, L. M., & DUMAS, P. Chemical imaging of biological tissue with synchrotron infrared light. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes*, 1758(7). 2006, p. 846-857.

⁴⁹ POLO, María P.; ROA, Diego F.; BRAVO, Jesús E. Propiedades reológicas de quinua (*Chenopodium quinoa* Wild) obtenidas mediante molienda abrasiva y tratamiento térmico. *Información tecnológica*, 2021, vol. 32, no 6, p. 53-64.

Figura 6 Perfil de viscosidad y flujo de la harina del perisperma

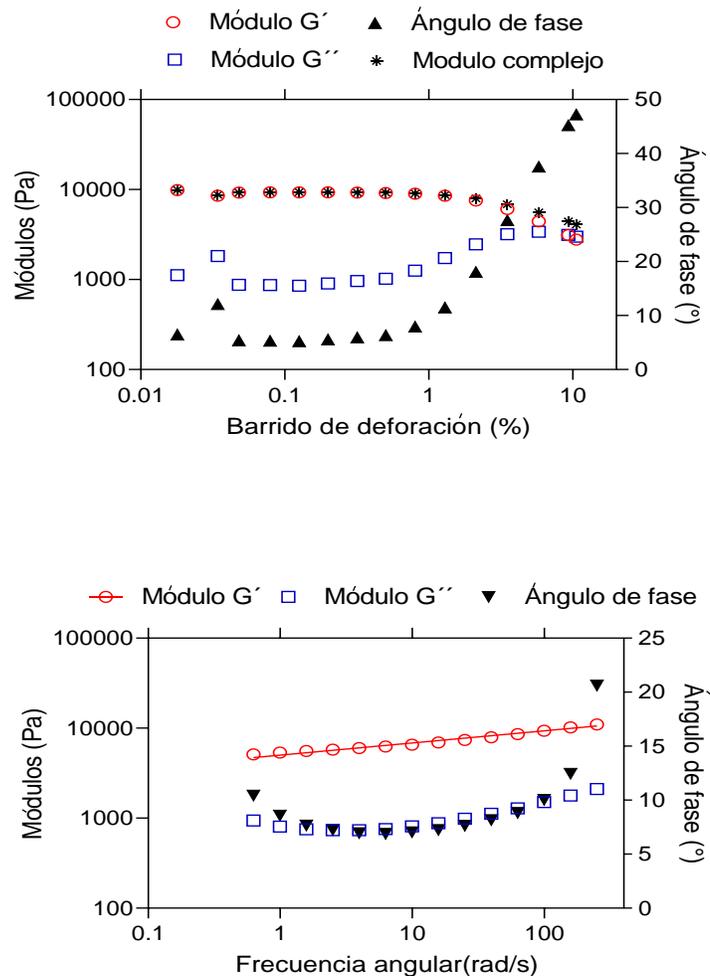


Se determinó el perfil de viscosidad y se observaron valores de temperatura de pasting 70.7°C, pico de viscosidad de 0.823 Pa*s, Throug 0.731 Pa*s y una viscosidad final de 2.032 Pa*s y un valor del Setback positivo de 1.03 Pa*S. Los resultados anteriores muestran una tendencia a la retrogradación durante la fase de enfriamiento, este comportamiento es común con las harinas ricas en almidón que no han sido sometidas a tratamientos termo físicos.

6.4 COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO DE LA HARINA PERISPERMA

Se realizó el barrido de deformación para obtener el rango de viscoelasticidad lineal, se observa que a partir del 1% el comportamiento del Angulo de fase cambia e inicia un aumento, indicando que si se sigue deformando el material su estructura no se recuperara a su estado inicial. Este dato nos indica que hay un límite en el cual este gel puede ser sometido a esfuerzos mecánicos. Por otra parte, este dato nos indica cual es la deformación que se debe aplicar como límite para el barrido de frecuencia y poder determinar la estabilidad.

Figura 7 Comportamiento viscoelástico de la harina del perisperma



El barrido de frecuencia mostro una independencia hasta los 10Hz, luego el gel va adquiriendo dependencia a la frecuencia, indicando su inestabilidad. Al modelar los datos con la ecuación de Roos-Murphy se determinó un índice n de 0,1351 el cual es bajo y, por lo tanto, se considera un gel fuerte en estado de reposo o pequeñas perturbaciones (10Hz), si aumentan las perturbaciones es probable que el gel se desestabilice y comienza a liberar agua en el proceso de sinéresis.

6.5 CAPACIDAD ENCAPSULANTE DEL COPRODUCTO DE LA MOLIENDA DE QUINUA

En el siguiente apartado se evaluó la capacidad encapsulante de las harinas (HP: harina de perisperma) (QA: almidón de quinua) y se evaluó el efecto emulsificante de las proteínas (12,4, $\pm 0,1$ %) presentes en la harina HP, diseñando sistemas con y sin gelatina (Ge) agregada. Se utilizaron 3 fracciones (HP; QA; QA-Ge). Una vez seleccionada la fracción con mejor capacidad encapsulante se evaluaron los efectos de la temperatura de almacenamiento (5 Y 25 °C, durante 40 días).

6.5.1 Evaluación de las matrices para la encapsulación de β -caroteno. Existen distintos materiales de encapsulación como almidones, las maltodextrinas, los sólidos de jarabe de maíz y las gomas de acacia y componen una estructura denominada “pared” donde actúan como barrera que protege contra el deterioro, además permite la liberación bajo condiciones específicas de los elementos, compuestos o sustancias de interés contenidas en su interior “núcleo”⁵⁰. Para efectos de que la encapsulación sea eficiente, es fundamental tener en cuenta los diferentes componentes presentes en la matriz y por lo tanto el almidón se vuelve

⁵⁰ KLAYPRADIT, W. y HUANG, Y.-W. Encapsulación de aceite de pescado con quitosano usando atomizador ultrasónico. LWT-Ciencia y tecnología de los alimentos, 41(6). 2008, p. 1133–1139.

una excelente alternativa en vista a su bajo costo, disponibilidad y propiedades, además, el almidón es usado como un ingrediente que permite reforzar las características tecnológicas de los alimentos⁵¹. Sin embargo, Lokuwan demuestra que el almidón modificado mejora las propiedades del almidón nativo y amplía su potencial como material de pared⁵².

La figura 8 muestra la cantidad de β -caroteno total que fue encapsulado en las dispersiones a partir de las diferentes harinas. Se observa en la figura 7 que la dispersión a base de harina del perisperma pudo incorporar 5,5 mg de β -caroteno/g HP. Por otra parte, las dispersiones de QA solamente alcanzaron a incorporar 2,0 mg de β -caroteno/g QA, mientras que, la dispersión de QA-Ge alcanzó 3,1 mg de β -caroteno/g QA-Ge.

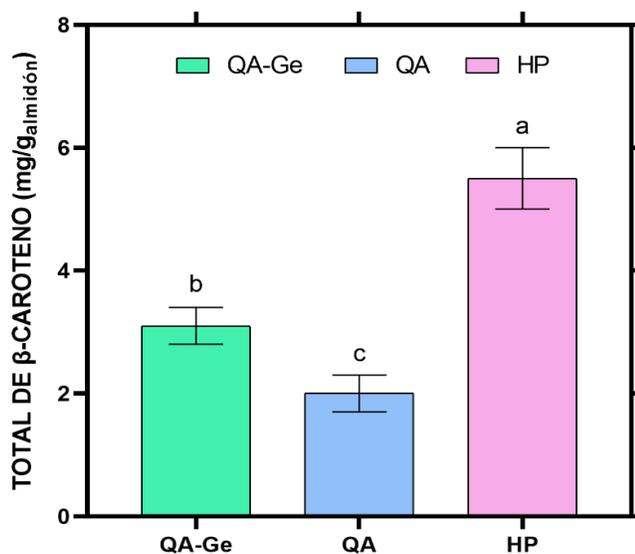
Luego del análisis comparativo los resultados muestran que la proteína del perisperma del grano de quinua mostró una mejor capacidad emulsificante, ya que fue capaz de retener más contenido de caroteno en comparación a la proteína de la gelatina empleada como agente emulsificante en la dispersión QA-Ge, resultados similares en la investigación de Roa⁵³ al realizar un análisis de la retención de β -caroteno en diferentes matrices. Por otra parte, el almidón de quinua no mostró buena capacidad emulsificante para retener el β -caroteno, el cual nos indica que existen diferencias significativas entre los tratamientos empleados.

⁵¹ VILLARROEL, P., et al. Almidón resistente: Características tecnológicas e intereses fisiológicos. *Revista chilena de nutrición*, 45(3). 2018, p. 271-278.

⁵² LOKSUWAN, J. Characteristics of microencapsulated β -carotene formed by spray drying with modified tapioca starch, native tapioca starch and maltodextrin. *Food hydrocolloids*, 21(5-6). 2007, p. 928-935.

⁵³ ROA-ACOSTA, D. F., NIETO-CALVACHE, J. E., & AGUDELO-LAVERDE, L. Relative humidity effect on encapsulation properties of coproducts obtained from wet milling of amaranth grain. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 19(1). 2021, p. 32-44.

Figura 8 Contenido total de β -caroteno en las matrices de almidón de quinua en diferente composición y tratamiento.



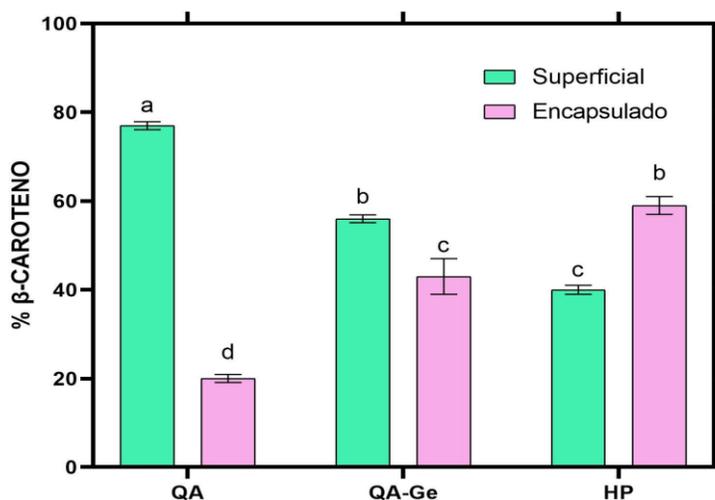
Los valores de desviación estándar fueron incluidos. Las diferentes letras sobre las columnas (a-c) muestran diferencias significativas con un valor- $p < 0,05$. QA almidón de quinua; QA-Ge almidón de quinua con adición de gelatina; HP Harina del perisperma almidonoso.

La figura 9 muestra que la harina (QA) alcanza una mayor cantidad de β - caroteno superficial comparado con las demás harinas, mientras su capacidad de encapsulación fue solo de un 21 %. Por otro lado, se observa como el efecto de la gelatina en la harina (QA-Ge) incrementa su capacidad de encapsulación a 43 % y disminuye la retención de β -caroteno superficial. Es importante mencionar que gracias a los efectos de la proteína nativa de la quinua HP permitieron alcanzar un nivel de encapsulación de 59 %, mientras su contenido superficial disminuye considerablemente comparado con las demás harinas.

Se evidencia un efecto positivo de las proteínas (gelatina y nativa del grano) en los procesos de emulsificación y encapsulación, sin embargo, la proteína nativa del grano mostró mejores resultados, lo cual es muy importante si se quiere emplear

esta harina del perisperma como un agente funcional en el desarrollo y en la elaboración de productos alimenticios.

Figura 9 Contenido porcentual de β -caroteno superficial y encapsulado en las fracciones de almidón de quinua de diferente composición y tratamiento



Los valores de desvío estándar fueron incluidos. Las diferentes letras sobre las columnas (a-c) muestran diferencias significativas con un valor-p <0,05. QA almidón de quinua; QA-Ge almidón de quinua con aditivo de gelatina; HP Harina del perisperma almidonoso.

En la tabla 3 se muestra el rendimiento de encapsulación alcanzado para cada sistema. Un rendimiento cercano a 1 implica que por cada miligramo de β -caroteno encapsulado hay una cantidad similar superficial; un rendimiento mayor a 1 implica una mayor cantidad superficial, mientras que cuanto menor a 1 sea, mejor será la proporción de β -caroteno encapsulado, así como lo menciona Roa⁵⁴ en su investigación sobre el “Efecto de la humedad relativa en la capacidad encapsulante de los coproductos de la molienda húmeda del grano de amaranto”, la superficie y el β -caroteno encapsulado se afectan de la misma manera, no existen diferencias

⁵⁴ Ibid.

entre ambas matrices y esto puede deberse a que el encapsulado y los mecanismos de protección son iguales para ambos sistemas.

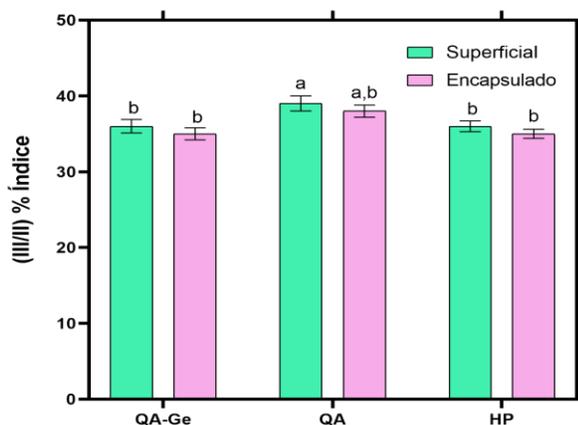
Tabla 3 Rendimiento de encapsulación del β -caroteno en diferentes matrices.

| Fracciones | Rendimiento β -caroteno Superficial/Encapsulado |
|------------|---|
| QA | 3,5 \pm 0,01 |
| QA-Ge | 1,4 \pm 0,03 |
| HP | 0,7 \pm 0,01 |

En la figura 10 se observa el índice de estabilidad (III/II %) el cual muestra el estado estructural de los antioxidantes, revelando posibles isomerizaciones y diferencias estructurales de los carotenoides, así como lo demuestra Domínguez⁵⁵ cuando evaluaron el efecto de almacenamiento sobre los carotenoides en diferentes temperaturas y condiciones.

⁵⁵ DOMÍNGUEZ CAÑEDO, I. L., CANO SARMIENTO, C., & VIVEROS CONTRERAS, R. Propiedades termodinámicas de la oleoresina de chile habanero (*Capsicum Chinense*) microencapsulada en β -ciclodextrina. *Nova scientia*, 10(20). 2018, p. 305-327.

Figura 10 Índice de estabilidad del β -caroteno en fracciones de almidón de quinua de diferente composición y tratamiento.



El índice (III/II) es la relación entre la altura del pico de absorción a 477nm (III) y a 450nm (II), Se incluyeron los valores de desviación estándar.

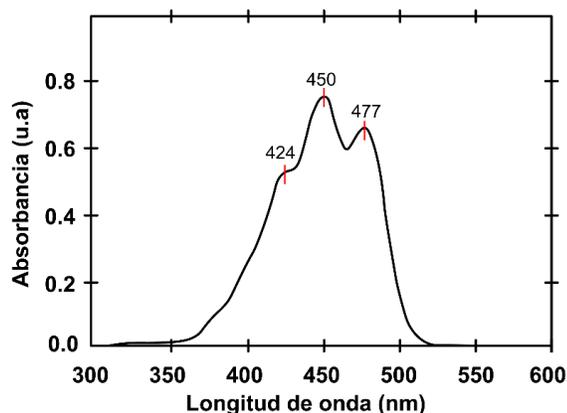
Por otra parte, Rodríguez⁵⁶ habla de que el β -caroteno tiene una absorción a longitudes de onda entre 430 a 480 nm, mientras que Restrepo⁵⁷ menciona que la longitud de onda de máxima absorbancia del β -caroteno está entre 466 nm y 496 nm, además Godlinho afirma que cuando el β -caroteno es bicíclico, tiene una absorbancia máxima a 450 nm y 477 nm y también una inflexión (hombro) a 425 nm⁵⁸. Mencionado esto podemos inferir que según los resultados obtenidos en la investigación (477, 450, 424 nm) como lo muestra la figura 11 son similares a la bibliografía y corresponden al β -caroteno bicíclico.

⁵⁶ RODRÍGUEZ AMAYA, D. B. A guide to carotenoid analysis in foods. 2001.

⁵⁷ RESTREPO GALLEGO, M. Substitution of colorants in food. *Revista lasallista de investigación*, 4(1). 2007, p. 35-39.

⁵⁸ GODLINHO, A.; BHOSLE, S. Carotene produced by alkaliphilic orange-pigmented strain of *Microbacterium arborescens*–AGSB isolated from costal sand dunes. *Indian J Mar Sci*, 2008, vol. 37, no 3, p. 307-312.

Figura 11 Espectro de β -caroteno utilizado en el trabajo de investigación.



Se requiere un análisis por HPLC de la muestra y patrones como control para explicar en detalle este punto. Independientemente del valor inicial del índice, el mismo no mostró variaciones significativas en ninguna de las fracciones en la figura 10, lo que significa que la estructura del carotenoide encapsulado se mantuvo estable.

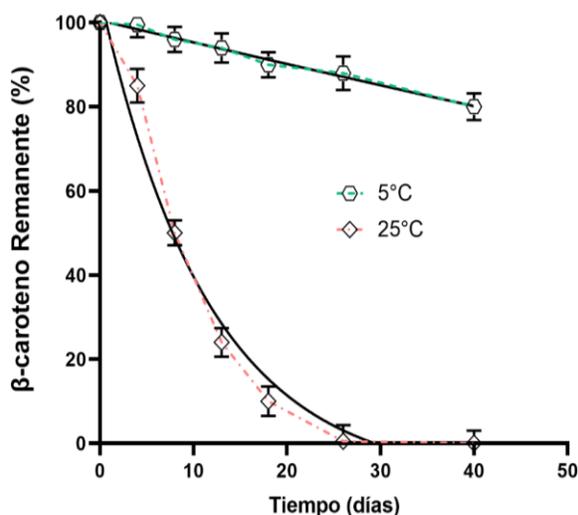
6.5.2 Evaluación de la de estabilidad térmica del β -caroteno encapsulado en la harina del perisperma (HP). Por lo general, los carotenos tienen todos sus dobles enlaces en forma del isómero *trans* pero se presentan cambios en la estructura y además se puede generar una reacción de isomerización y transformarse parcialmente en la forma *cis* durante tratamientos térmicos en ausencia de oxígeno y además estudios revelan que la degradación del β -caroteno y licopeno a diferentes condiciones de calentamiento sigue una cinética de primer orden⁵⁹.

⁵⁹ MELÉNDEZ, MARTÍNEZ, A. J., VICARIO, I. M., & HEREDIA, F. J. Estabilidad de los pigmentos carotenoides en los alimentos. *Archivos latinoamericanos de nutrición*, 54(2). 2004, p. 209-215.

En la figura 12 se puede observar el comportamiento de la degradación del β -caroteno remanente superficial y encapsulado en la harina del perisperma (HP) al someterlas a dos temperaturas (5 y 25°C) en un tiempo de 40 días. Del mismo modo se evidencia que la degradación del β -caroteno trabaja en función de la temperatura.

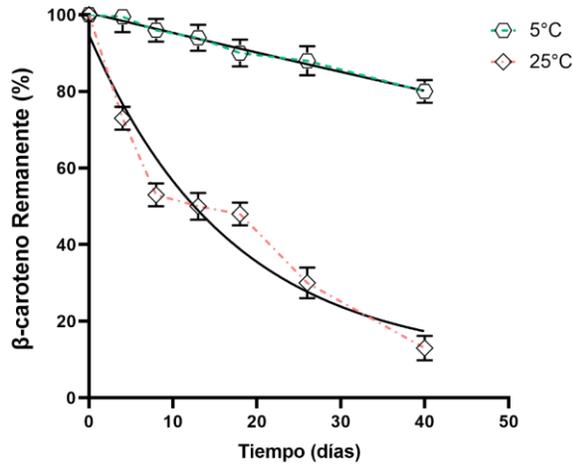
El contenido de β -caroteno superficial y encapsulado en la mezcla sometida a una temperatura de 5°C no presenta muchas diferencias significativas cuando alcanzó el 40 día de almacenamiento con un porcentaje de $85,5 \pm 4 \%$ y $86 \pm 3 \%$, respectivamente.

Figura 12 Comportamiento del β -caroteno superficial remanente en la fracción HP a diferentes temperaturas de almacenamiento durante 40 días.



Desde el día cero se observan cambios notables en el contenido del β -caroteno superficial y encapsulado almacenado a 25°C. Se evidencia que se conserva un $35 \pm 3 \%$ del contenido de β -caroteno encapsulado a los 26 días, mientras que el β -caroteno superficial es degradado totalmente en el mismo lapso de tiempo. El contenido del β -caroteno encapsulado a 25°C durante 40 días fue de $17 \pm 4 \%$.

Figura 13 Comportamiento del β -caroteno encapsulado remanente en la harina de perisperma (HP) a diferentes temperaturas de almacenamiento durante 40 días.



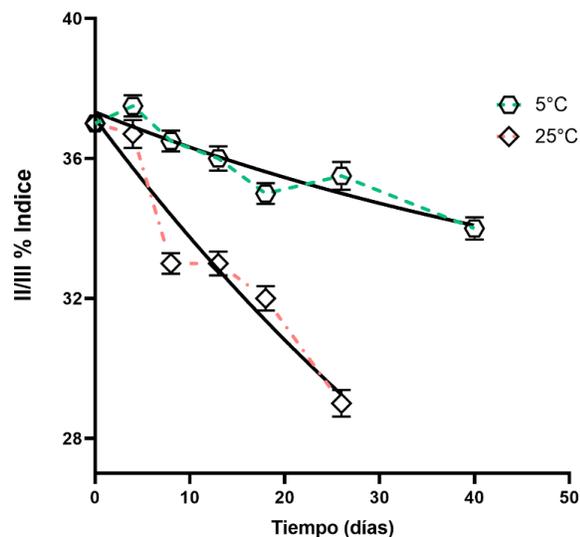
En la investigación se evidencia las diferencias significativas del contenido de β -caroteno encapsulado remanente en comparación con el día cero; por otra parte las muestras almacenadas a una condición de 25°C muestran que el efecto protector de la matriz al día 40 provocó una degradación de un 19 % en comparación con la condición de almacenamiento a una temperatura de 5°C que refleja que al día 40 se ha degradado un 83 %, notándose así que al aumentar la temperatura el efecto protector afecta en la degradación del β -caroteno.

La degradación del β -caroteno por efectos de temperatura fue estudiada en la investigación de Meléndez que refleja que además de la temperatura, también la luz o el pH, son factores que crean cambios considerables y se debe a reacciones de isomerización⁶⁰. De igual manera López en su investigación sobre el encapsulamiento de β -caroteno en nanoemulsiones estabilizadas con complejos solubles de hidrolizado de proteína de lactosuero-pectina cítrica, muestran nanoemulsiones compuestas con ingredientes naturales que pueden encapsular

⁶⁰ Ibid.

compuestos bioactivos, utilizando complejos hidrolizados con diferentes concentraciones de β -caroteno, comparando así en un lapso de 30 días de almacenamiento y obteniendo como resultado la concentración presente al día 1 de preparación, la cual no obtuvo cambios mientras el β -caroteno estudiada en un tiempo de 30 días obtuvo un cambio de eficiencia de encapsulamiento, cabe recalcar que los autores pudieron establecer y proteger la integridad del β -caroteno encapsulado mediante la creación de una película, además, estos observaron que la degradación del β -caroteno se podría deber a cambios como luz, temperatura, tiempo o pH⁶¹.

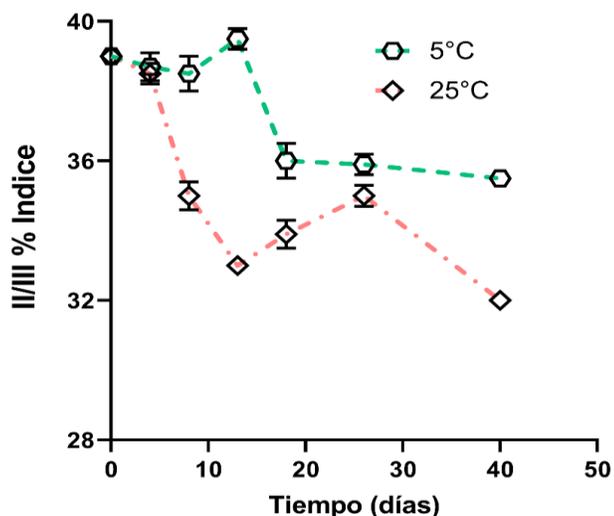
Figura 14 Índice de estabilidad del β -caroteno superficial remanente en la harina de perisperma a diferentes temperaturas de almacenamiento durante 40 días



El índice (III/II) es la relación entre la altura del pico de absorción a la longitud de onda mayor 503nm (III) y el pico de absorción media 472nm (II). La base de línea fue tomada por el mínimo entre los dos picos. Fueron incluidos los valores de desvió estándar.

⁶¹ LÓPEZ, M, D. Encapsulamiento de Beta-caroteno en nanoemulsiones estabilizadas con complejos solubles de hidrolizado de proteína-polisacárido. 2016.

Figura 15 Comportamiento del índice de estabilidad (III/II) del β -caroteno encapsulado remanente en la fracción FA a diferentes temperaturas de almacenamiento durante 40 días.



El índice (III/II) es la relación entre la altura del pico de absorción a la longitud de onda mayor 503nm (III) y el pico de absorción media 472nm (II). La base de línea fue tomada por el mínimo entre los dos picos. Fueron incluidos los valores de desvió estándar.

Según el resultado reflejado en la figura 14 nos indica el índice de estabilidad (III/II) del β -caroteno superficial durante 40 días, mostrando así que la temperatura influye en comparación con la figura 15 donde nos refleja el comportamiento del β -caroteno encapsulado a temperaturas de 5°C y 25°C. Consecuentemente se puede inferir de acuerdo a los resultados obtenidos que uno de los factores que dan paso a la degradación del β -caroteno superficial es la temperatura, y es por ello que resulta de gran importancia la encapsulación en la conservación y almacenamiento con el fin de prevenir reacciones desfavorables en el alimento. De mismo modo existen diferentes factores que pueden influir en la degradación del β -caroteno como su estructura, exposición a la luz, actividad de agua, presencia de oxidantes y antioxidantes, presencia de sulfitos y demás⁶².

⁶² GONZÁLEZ, C, M. Evaluación de las propiedades fisicoquímicas, reológicas y sensoriales de untables naturales. 2016.

En el espectro resultante del β -caroteno sometido a procesos de encapsulación logró una estabilidad de los picos de absorbancia entre 470, 460 y 430 nm, lo cual referencia el estado estructural de los antioxidantes, indicando así que se pueden formar posibles cambios en la estructura de los β -carotenos, al igual se compara la absorción de los carotenos con bibliografía referenciada y se observa que tiene una similitud al espectro de absorción máxima del β -caroteno, que es 450 de longitud de onda; Cabe resaltar que su absorbancia es directamente proporcional a la concentración del solvente⁶³.

⁶³ LIBKIND, D., MOLINÉ, M., & VANBROOCK, M. Posibles mecanismos de fotoprotección en levaduras. *Revista electrónica de Radiobiología*, 4. 2004, p. 84-88.

7. CONCLUSIONES

Se identificó que la molienda abrasiva refleja ser un método eficiente para la obtención de la harina del germen (HG) y el coproducto de harina del perisperma (HP). Además, se determinó que la composición química del grano de quinua cambia en las diferentes fracciones, siendo la fracción HP (Harina del perisperma) la que obtiene mayores resultados en el contenido de carbohidratos, alcanzando el (83,3 %), 20 % más en comparación con el grano entero, y se presenta una reducción de lípidos y proteínas a un 36,7 % y 28,7 %. Por otra parte, la harina del germen aumenta casi el doble del porcentaje en su contenido de lípidos y proteínas (19 %) y (34 %), respectivamente.

Se determinó mediante FTIR los diferentes picos de absorbancia máxima característicos en las distintas escalas de longitudes de onda, identificando las 3 regiones de interés: Carbohidratos ($800-1200\text{ cm}^{-1}$), proteínas ($1500-1800\text{ cm}^{-1}$) y lípidos ($2800-3000\text{ cm}^{-1}$). Los análisis mediante FTIR se convierten en una excelente alternativa para determinar componentes que son mayoritarios en un producto y a su vez definir posibles aplicaciones en la industria alimentario o no alimentaria.

La harina del perisperma mostro un perfil de viscosidad similar a los almidones nativos, sin embargo, a bajas concentraciones su comportamiento newtoniano la le brinda la posibilidad de ser una materia prima que se emplea en bebidas instantáneas luego de modificaciones físicas y químicas. Los geles que forman son geles con tendencia a ser fuertes, sin embargo, su estabilidad depende de la frecuencia, lo cual los hace inestables en el tiempo y podrían presentar sinéresis.

Se estudió la capacidad de encapsulación del antioxidante β -caroteno mediante el método de liofilización en las fracciones de Almidón de Quinua (QA), Almidón de

Quinoa más gelatina (QA-Ge) y la fracción de harina del perisperma (HP), mostrando esta última fracción HP un excelente rendimiento en cuanto al contenido total de encapsulado en comparación de las demás, aunque se evidencia que existen factores que afectan directamente la estabilidad de retención como lo es la temperatura, y se vio reflejado los datos obtenidos en la investigación, sin embargo, es importante realizar diferentes evaluaciones donde se involucren otros factores como humedad, ph, entre otros que permitan reforzar su posible potencial en la industria alimentaria, brindando un valor agregado, o emplearlo como materia prima que permita mejorar las propiedades de los productos.

8. BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA, D. F., CALLEJAS, C. G., & YONDA, Y. C. Seguimiento de la molienda abrasiva del grano de amaranto para la obtención de dos fracciones con potencial industrial. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial: BSAA*, 15(1), 2017, p. 59-66.

ALBADALEJO Tomás, E. Efecto del tiempo de escaldado sobre las propiedades tecnofuncionales y antioxidantes de las harinas obtenidas a partir de tres tipos de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). 2019.

ARANEDA, C., & VALENZUELA, F. Microencapsulación de extractantes: una metodología alternativa de extracción de metales. *Revista Ciencia Ahora*, 22(11), 2009, p. 9-19.

AVILÉS, G. R. Obtención y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca. *Ingeniería y ciencia*, 2(4). 2006, p. 5-28.

BURRIEZA, H. P., *et al.* Shotgun proteomic analysis of quinoa seeds reveals novel lysine-rich seed storage globulins. *Food chemistry*, 293. 2019, p. 299-306.

BUSTOS, Claudio Raúl Bernal, *et al.* Quinoa, *Chenopodium quinoa* (Willd.) en Colombia Caracterización de granulos de almidón nativo de quinoa por IR-ATR, MEB, DRX. *Revista de Investigación*, 2015, vol. 8, no 2, p. 122-131.

CARDONA SERRATE, F. Proteínas y aminoácidos en alimentos. Propiedades físico-químicas y funcionales. 2020.

CASTILLO, S. M., GONZÁLEZ, P. M. Desarrollo de un proceso tecnológico para obtener una harina hiperproteica de quinua, aplicable en la empresa SEGALCO S.A.S. Tesis de trabajo de grado en la modalidad de investigación. Universidad del Cauca, repositorio Universidad del Cauca. 2018.

CELY TORRES, L. A., & DUCÓN SALAS, J. C. Posibilidades en el comercio internacional de la quinua: un análisis desde la perspectiva de la competitividad. *Equidad y Desarrollo*, 1(24), 2015, p. 119-137.

CHOQUEHUAYTA HUAMANSAYRE, D. H. Análisis reológico de harinas y almidones aislados de cinco variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) para su utilización en la elaboración de mazamorra. 2017.

CORNEJO VILLEGAS, M. D. L. Á., et al. effect of Ca²⁺ ions on the pasting, morphological, structural, vibrational, and mechanical properties of corn starch–water system. *Journal of cereal science*. 2018.

COZZOLINO, D. Near infrared spectroscopy and food authenticity. In *Advances in Food Traceability Techniques and Technologies*. Woodhead Publishing. 2016, p. 119-136.

CUI, S. W. (Ed.). *Food carbohydrates: chemistry, physical properties, and applications*. CRC press. 2005.

DOMÍNGUEZ CAÑEDO, I. L., CANO SARMIENTO, C., & VIVEROS CONTRERAS, R. Propiedades termodinámicas de la oleorresina de chile habanero (*Capsicum Chinense*) microencapsulada en β -ciclodextrina. *Nova scientia*, 10(20). 2018, p. 305-327.

FAO, F., OMS, P., & UNICEF. El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2019. Protegerse frente a la desaceleración y el debilitamiento de la economía. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)*. 2019.

FINKEL'SHTEIN, E. I. Modern methods of analysis of carotenoids. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 50(2). 2016, p. 96-107.

ABARCA GARCÍA, Freddy Giovanni, et al. Estudio de las propiedades fisicoquímicas y reológicas de suspensiones de gluten de trigo a partir de un solvente binario para la obtención de nanopartículas por electroaspersión. Tesis de Maestría, Universidad de Sonora. Sonora, 2022.

GOBERNACIÓN DEL CAUCA. Quinoa: Semilla de Desarrollo y crecimiento para el Cauca. (2019) <http://www.cauca.gov.co/noticias/quinua-semilla-de-desarrollo-y-crecimiento-para-el-cauca>.

GODLINHO, A.; BHOSLE, S. Carotene produced by alkaliphilic orange-pigmented strain of *Microbacterium arborescens*–AGSB isolated from costal sand dunes. *Indian J Mar Sci*, 2008, vol. 37, no 3, p. 307-312.

GONZÁLEZ, C, M. Evaluación de las propiedades fisicoquímicas, reológicas y sensoriales de untables naturales. 2016.

GÓMEZ FARFÁN, L. L. Evaluación del comportamiento reológico de harina de trigo empleando concentrado proteico de Kiwicha (*Amaranthus Caudatus*) como mejorador, para su aplicación en la elaboración de producto de panificación–Lambayeque 2015. 2017.

GRANDA RUEDA, M.D. Polímeros a base de almidón como sustitutos de los plásticos de un solo uso. [Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación presentado como requisito previo a la obtención del Título de Química].UCE. 2021.

HOSPODAROVA, V., SINGOVSKA, E., & STEVULOVA, N. Characterization of cellulosic fibers by FTIR spectroscopy for their further implementation to building materials. *American journal of analytical chemistry*, 9(6), 2018, p. 303-310.

JAMES, L. E. A. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): composition, chemistry, nutritional, and functional properties. *Advances in food and nutrition research*, 58, 2009, p. 1-31.

KLAYPRADIT, W. y HUANG, Y.-W. Encapsulación de aceite de pescado con quitosano usando atomizador ultrasónico. *LWT-Ciencia y tecnología de los alimentos*, 41(6). 2008, p. 1133–1139.

KUHNEN, Shirley, et al. ATR-FTIR spectroscopy and chemometric analysis applied to discrimination of landrace maize flours produced in southern Brazil. *International journal of food science & technology*, 2010, vol. 45, no 8, p. 1673-1681.

LIBKIND, D., MOLINÉ, M., & VANBROECK, M. Posibles mecanismos de fotoprotección en levaduras. *Revista electrónica de Radiobiología*, 4. 2004, p. 84-88.

LÓPEZ, M, D. Encapsulamiento de Beta-caroteno en nanoemulsiones estabilizadas con complejos solubles de hidrolizado de proteína-polisacárido. 2016.

LOZANO, R., TAPIA, I. L., & TACO, V. J. Evaluación de las propiedades funcionales del aislado proteico de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) variedad INIAP-

TUNKAHUAN con potencial uso en la nutrición humana. *Revista de la Facultad de Ciencias Médicas (Quito)*, 44(1), 2019, p. 48-56.

LOKSUWAN, J. Characteristics of microencapsulated β -carotene formed by spray drying with modified tapioca starch, native tapioca starch and maltodextrin. *Food hydrocolloids*, 21(5-6). 2007, p. 928-935.

LOPEZ, Yesika B.; ROA, Diego F. y BRAVO, Jesús E. Efecto del tratamiento térmico en la estabilidad de geles obtenidos a partir de harinas de quinua. *Información tecnológica*, 2022, vol. 33, no 1, p. 203-214.

MARENCO, D. A. Espectroscopia infrarroja: una técnica alternativa para la identificación de microorganismos. *Ciencia y salud Virtual*, 4(1), 2012, p. 123-131.

MELÉNDEZ, MARTÍNEZ, A. J., VICARIO, I. M., & HEREDIA, F. J. Estabilidad de los pigmentos carotenoides en los alimentos. *Archivos latinoamericanos de nutrición*, 54(2). 2004, p. 209-215.

MILLER, L. M., & DUMAS, P. Chemical imaging of biological tissue with synchrotron infrared light. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes*, 1758(7). 2006, p. 846-857.

MONTELLANO DURAN, N. Propiedades estructurales y funcionales de las proteínas de *Chenopodium quinoa* y sus hidrolizados. 2018.

MONTES, E, J., DE PAULA, C, D., ORTEGA, F. Determinación de las condiciones óptimas de encapsulamiento por co-cristalización de jugo de maracuyá (*Passiflora edulis*). *Temas agrarios*, 2007, vol. 12, no 1, p. 5-12.

MONTILLA, A. & JOAQUI, B. Subproducto de la molienda húmeda del grano de amaranto: caracterización física, estructural y reológica. Trabajo de grado en la modalidad de investigación. Universidad del Cauca, repositorio Universidad del Cauca. 2018.

NANDIYANTO, A. B. D., OKTIANI, R., & RAGADHITA, R. How to read and interpret FTIR spectroscopy of organic material. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 4(1), 2019, p. 97-118.

PARRA, H, R. Revisión: microencapsulación de alimentos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 2010, vol. 63, no 2, p. 5669-5684.

POLO, María P.; ROA, Diego F.; BRAVO, Jesús E. Propiedades reológicas de quinua (*Chenopodium quinoa* Wild) obtenidas mediante molienda abrasiva y tratamiento térmico. *Información tecnológica*, 2021, vol. 32, no 6, p. 53-64.

ORSINI, S. M. D., & APARICIO, G. P. P. Espectroscopia De Infrarrojo Con Transformada De Fourier (FT-IR) para análisis de muestras de harina de trigo, fécula de maíz y almidón de yuca. @ *limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 19(1). 2021, p. 5-16.

PRABHU, A., ABDUL, K. S., & REKHA, P. D. Isolation and Purification of Lutein from Indian Spinach *Basella alba*. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, 8(10). 2015, p. 1379-1382.

QUINUA, F. A. O. Cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial (sitio en Internet). Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y alimentación. Oficina Regional para América Latina y el Caribe: Bolivia; 2011.

RAMOS, D. S., CÁRDENAS, J. DE D, F., & MEDINA, J. J. Viscoelastic behaviour of masa from corn flours obtained by nixtamalization with different calcium sources. *Food Chemistry*. 2018, vol. 248, p. 21-28.

RESTREPO GALLEGO, M. Substitution of colorants in food. *Revista lasallista de investigación*, 4(1). 2007, p. 35-39.

RIOS AGUIRRE, S., & GIL GARZÓN, M. A. Microencapsulación por secado por aspersión de compuestos bioactivos en diversas matrices: una revisión. *TecnoLógicas*, 24(51), e1836-e1836. 2021.

ROA-Acosta, D. F., *et al.* Hyper-protein quinoa flour (*Chenopodium Quinoa Wild*): Monitoring and study of structural and rheological properties. *LWT*, 2020, p. 121, 108952.

ROA ACOSTA, D. F. *Métodos de molienda seca y húmeda en molino planetario para la obtención y caracterización de fracciones de amaranto y su aplicación como agente encapsulante* (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales). 2015.

ROA-ACOSTA, D. F., NIETO-CALVACHE, J. E., & AGUDELO-LAVERDE, L. Relative humidity effect on encapsulation properties of coproducts obtained from wet milling of amaranth grain. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 19(1). 2021, p. 32-44.

ROA, Diego F., *et al.* Encapsulation and stabilization of β -carotene in amaranth matrices obtained by dry and wet assisted ball milling. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, vol. 10, no 3, p. 512-521.

RODRÍGUEZ AMAYA, D. B. A guide to carotenoid analysis in foods. 2001

ROJAS, W., *et al.* XII. Valor nutricional, agroindustrial y funcional de los granos andinos. *Granos Andinos*, 2010, p. 151.

SANTOS Martinez, T. L. Mercado potencial para la Quinoa colombiana. 2020.

SU, YL, *et al.* Microencapsulación de nanopartículas de Radix salvia miltiorrhiza mediante secado por aspersión. *Tecnología de polvo*, 2008, vol. 184, nº 1, pág. 114-121.

TÉLLEZ MESA, C. Aplicaciones de la espectroscopía infrarroja en el análisis de alimentos. 2019.

VASQUEZ-Lara, F. *et al.* Efecto de la sustitución de harina de trigo con harina de quinoa (*Chenopodium quinoa*) sobre las propiedades reológicas de la masa y texturales del pan. *Revista iberoamericana de tecnología postcosecha*, 17(2), 2016, p. 307-317.

VILLARROEL, P., *et al.* Almidón resistente: Características tecnológicas e intereses fisiológicos. *Revista chilena de nutrición*, 45(3). 2018, p. 271-278.

ZAGHDOUDI, K., NGOMO, O., VANDERESSE, R., ARNOUX, P., MYRZAKHMETOV, B., FROCHOT, C., & GUIAVARC'H, Y. Extraction, Identification and Photo-Physical Characterization of Persimmon (*Diospyros kaki* L.) Carotenoids. *Foods*, 6(1), 4. 2017.