



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA
CARRERA DE ALIMENTOS

Tema: Evaluación de la capacidad antioxidante del extracto de oca (*Oxalis tuberosa* Mol.) microencapsulado mediante secado por aspersión y su potencial como ingrediente funcional

Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, previo a la obtención de título de Ingeniera en Alimentos, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato, a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Autor: Johanna Alexandra Criollo Muzo

Tutor: Dr. José Homero Vargas López

Ambato-Ecuador

Julio – 2026

APROBACIÓN DEL TUTOR

Dr. José Homero Vargas López

CERTIFICA:

Que el presente Informe Final del Trabajo de Titulación ha sido prolijamente revisado. Por lo tanto, autorizo la presentación de este Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, el mismo que responde a las normas establecidas en el Reglamento de Títulos y grados de la Facultad de Ciencias e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Ambato, 1 de junio del 2026



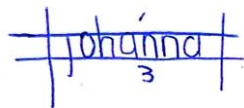
Dr. José Homero Vargas López

18XXXXXXX48

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Johanna Alexandra Criollo Muzo, manifiesto que los resultados obtenidos en el presente Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingeniera en Alimentos son absolutamente originales, auténticos y personales; a excepción de las citas bibliográficas.



Johanna Alexandra Criollo Muzo

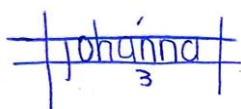
18XXXXXX02

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga uso de este Informe Final del Trabajo de Titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Informe Final del Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

A handwritten signature in blue ink, reading "Johanna" with a small "3" below it, enclosed within a rectangular frame.

Johanna Alexandra Criollo Muzo

18XXXXXX02

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los suscritos Profesores Calificadores, aprueban el presente Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, el mismo que ha sido elaborado de conformidad con las disposiciones emitidas por la Facultad de Ciencia en Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato.

Para constancia firman:



.....
Presidente del Tribunal



.....
Dr. Rubén Darío Vilcacundo Chamorro
18XXXXXXX02



.....
Mg. Andrea Verónica Delgado Ramos
04XXXXXXX08

Ambato, 19 de junio del 2026

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por ser mi guía, mi fortaleza y mi refugio en cada momento de mi vida, gracias por darme la sabiduría, la paciencia y la valentía necesarias para no rendirme cuando el camino se volvió difícil.

A mi madre Lourdes Muzo, la persona más valiente y admirable que conozco, gracias por entregar tu vida entera a verme salir adelante. Si hoy logro cumplir una de las metas más importantes de mi vida, es gracias a ti, porque nunca me dejaste sola y jamás permitiste que me rindiera, este logro también es completamente tuyo, porque detrás de cada paso que di estuvo siempre tu amor, tu lucha y tu inmenso corazón.

A mi tío Bolívar Ramos, gracias por creer en mí, impulsarme a seguir adelante y desear siempre lo mejor para mi vida. Llevaré eternamente en mi corazón todo el cariño, cuidado y amor que me has brindado, tenerte en mi vida ha sido una bendición enorme, porque más que un tío, has sido un padre y una persona imprescindible en mi camino.

A mi hermano Anthony Criollo, por ser ese apoyo constante y esa persona que siempre estuvo para impulsarme a seguir adelante, gracias por acompañarme durante este proceso lleno de esfuerzo y sacrificio. Tenerte como hermano ha sido una bendición, porque siempre encontré en ti, comprensión, apoyo y ánimo para continuar luchando por mis metas.

Y de manera muy especial, a mi hermana Eilyn, mi apoyo incondicional y una de las personas más importantes de mi corazón, gracias por estar conmigo en cada etapa de mi vida, por escucharme en los momentos de tristeza, por compartir conmigo las alegrías y por brindarme siempre tu cariño sincero. Tu compañía fue un refugio en los días más difíciles y una motivación para nunca rendirme.

Gracias por creer en mí incluso cuando yo misma dudaba de mis capacidades. Tenerte como hermana ha sido uno de los regalos más hermosos que la vida me ha dado, porque además de familia, encontré en ti una amiga verdadera, una confidente y una compañera incondicional.

Finalmente, este sueño cumplido está dedicado a mi familia, porque gracias a su amor, confianza y apoyo incondicional hoy puedo celebrar una de las metas más importantes de mi vida profesional.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar un agradecimiento muy especial a mis mascotas, Chispitas, Perla y Yandi, quienes fueron mi fiel compañía durante tantas noches de desvelo. Y de manera muy especial, a mi mascota Esnupi, aunque no lograste verme culminar esta etapa tan importante, gracias por haberme regalado amor, compañía y felicidad en tantos momentos de mi vida. Siempre te recordaré con un inmenso cariño.

A Kevin Moyolema, gracias por tu apoyo incondicional, por estar presente en cada momento importante de este camino y por acompañarme incluso en los días más difíciles. Gracias por creer siempre en mí, por impulsarme a no rendirme y por hacerme sentir acompañada en cada paso de esta etapa tan importante de mi vida.

A mi tutor, el Doc. Homero Vargas, expreso mi más sincero agradecimiento. De igual manera, agradezco al Doc. Orestes, Ing. Rubén, Ing. Luis Tamayo y a la Ing. Mónica, por su colaboración, apoyo y enseñanzas brindadas durante este proceso.

Asimismo, quiero agradecer de corazón a mis amigas y amigos: Celena, Diana, Joselyn, Danna, Karina, Andrea, Kevin, Erick, Joseph, Damian y Jairo, por haber formado parte de esta etapa tan importante. Gracias por cada palabra de ánimo, cada consejo, cada momento compartido y por hacer más llevaderos los días difíciles. Su amistad, apoyo y cariño hicieron que este camino estuviera lleno de momentos especiales que siempre guardaré en mi corazón.

*“No permitas que tus miedos y debilidades
te alejen de tus objetivos”*

-Kyojuro Rengoku

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE ECUACIONES	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiv
RESUMEN EJECUTIVO	xv
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO	1
1. Antecedentes Investigativo	1
1.1.1 Justificación	1
1.1.2. Fundamentación científica-técnica	2
1.1.2.1. Origen de la oca (<i>Oxalis tuberosa</i> Mol.)	2
1.1.2.2. Taxonomía	2
1.1.2.3. Descripción botánica	2
1.1.2.4. Distribución geográfica	3
1.1.2.5. Composición nutricional	3
1.1.2.6. Composición química	4
1.1.2.7. Alimentos funcionales	5
1.1.2.8. Alimentos ricos en antioxidantes	5
1.1.2.9. Antioxidantes	6

1.1.2.10. Polifenoles	6
1.1.2.11. Microencapsulación.....	7
1.1.2.11.1. Secado por aspersión	8
1.1.2.11.2. Sustancias utilizadas en el recubrimiento en la microencapsulación	10
1.2 Objetivos.....	11
1.2.1. Objetivo General.....	11
1.2.2. Objetivos específicos.....	11
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	12
2.1 Materiales	12
2.1 Métodos	13
2.1.1. Recolección del material vegetal.....	13
2.1.2. Preparación del tubérculo	13
2.1.3. Determinación de pH y acidez titulable del tubérculo	14
2.1.4. Determinación de sólidos solubles del tubérculo	14
2.1.5. Extracción de polifenoles	15
2.1.5.1 Selección del disolvente químico óptimo para la extracción de compuestos polifenólicos	15
2.1.5.2. Curva de calibración con ácido gálico.....	17
2.1.5.3. Cuantificación del contenido polifenólico mediante la técnica de Follin Ciocalteu	17
2.1.6. Diseño experimental 3^2 para la extracción de polifenoles.	17
2.1.7. Determinación de sólidos totales del extracto de la Oca (<i>Oxalis tuberosa</i> Mol.) ..	19
2.1.8. Microencapsulación de los compuestos bioactivos mediante secado por aspersión	19
2.1.8.1. Rendimiento del microencapsulado de extracto de oca (<i>Oxalis Tuberosa</i> Mol.)20	
2.1.8.2. Eficiencia cuantitativa de la microencapsulación.....	20
2.1.8.3. Espectrofotometría Infrarroja	21

2.1.9. Determinar la capacidad antioxidante del extracto microencapsulado por el método DPPH (2,2 difenil- 1- picrilhidracilo).....	21
2.1.9.1. Evaluación de la capacidad antioxidante mediante DPPH.....	21
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
3.1 Análisis y discusión de resultados	23
3.1.1. Caracterización fisicoquímica de la muestra oca (<i>Oxalis Tuberosa</i> Mol.).....	23
3.1.2. Selección del disolvente	24
3.1.3. Diseño experimental 3^2 para la extracción de compuestos polifenólicos	26
3.1.4. Eficiencia cuantitativa de la microencapsulación.....	33
3.1.5. Espectro infrarrojo comparativo del extracto microencapsulado, extracto no microencapsulado y mezcla de polímero.....	35
3.1.6. Capacidad antioxidante del extracto microencapsulado por el método DPPH (2,2 difenil- 1- picrilhidracilo).	37
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38
4.1. Conclusiones.....	38
4.2. Recomendaciones	39
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
ANEXOS	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Taxonomía de oca (Oxalis tuberosa Mol.).</i>	2
Tabla 2. <i>Composición química de la oca por 100 g de material fresco.</i>	4
Tabla 3. <i>Recursos materiales.</i>	12
Tabla 4. <i>Niveles experimentales.</i>	18
Tabla 5. <i>Condiciones y corridas de diseño experimental propuesta.</i>	18
Tabla 6. <i>Caracterización fisicoquímica del tubérculo (Oxalis Tuberosa Mol.).</i>	23
Tabla 7. <i>Cuantificación de polifenoles totales en extractos de oca (Oxalis Tuberosa Mol.) según la concentración de etanol.</i>	25
Tabla 8. <i>Efecto de la relación matriz vegetal-solvente y el tiempo de extracción sobre el contenido de polifenoles totales en la oca (Oxalis tuberosa Mol.).</i>	26
Tabla 9. <i>Resultados del rendimiento y de la eficiencia de microencapsulación.</i>	33
Tabla 10. <i>Capacidad antioxidante del microencapsulado (Oxalis Tuberosa Mol.).</i>	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Diagrama sobre el mecanismo de secado por aspersión.</i>	10
Figura 2. <i>Efecto de la concentración de etanol en la extracción de polifenoles totales de la oca (Oxalis Tuberosa Mol.).</i>	24
Figura 3. <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el contenido de polifenoles totales (mg GAE/g) en extractos de oca (Oxalis Tuberosa Mol.).</i>	29
Figura 4. <i>Gráfica de efectos principales para el contenido de polifenoles totales (mg GAE/g) en extractos de oca (Oxalis tuberosa).</i>	30
Figura 5. <i>Gráfica de interacción entre la relación solvente-materia y el tiempo de extracción sobre la concentración de polifenoles totales.</i>	31
Figura 6. <i>Gráfica de superficie de respuesta en 3D para el contenido de polifenoles totales (mg GAE/ g) en función de la relación material vegetal-disolvente y el tiempo de extracción.</i>	32
Figura 7. <i>Espectro FTIR comparativo.</i>	35

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. <i>Determinación de acidez titulable.</i>	14
Ecuación 2. <i>Cálculo de concentración de extracto.</i>	16
Ecuación 3. <i>Corrección de contenido polifenólico.</i>	16
Ecuación 4. <i>Determinación de contenido polifenólico total</i>	16
Ecuación 5. <i>Determinación de sólidos totales.</i>	19
Ecuación 6. <i>Rendimiento de microencapsulado.</i>	20
Ecuación 7. <i>Determinación de eficiencia de la microencapsulación.</i>	21

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. <i>Recolección y limpieza del tubérculo.</i>	46
Anexo 2. <i>Análisis físicoquímicos del tubérculo.</i>	46
Anexo 3. <i>Concentración del mejor tratamiento.</i>	46
Anexo 4. <i>Microencapsulación del extracto de oca.</i>	47
Anexo 5. <i>Curva de calibración de ácido gálico.</i>	47
Anexo 6. <i>Análisis de varianza.</i>	47
Anexo 7. <i>Comparaciones por pareja Tukey (Relación*Tiempo).</i>	47
Anexo 8. <i>Optimización de respuesta (mg GAE/g).</i>	48
Anexo 9. <i>Espectro del encapsulante (maltodextrina).</i>	48
Anexo 10. <i>Espectro del microencapsulado de oca.</i>	49
Anexo 11. <i>Espectro del extracto no microencapsulado.</i>	49
Anexo 12. <i>Curva de calibración de ácido gálico.</i>	49
Anexo 13. <i>Informe de actividad antioxidante.</i>	50

RESUMEN EJECUTIVO

En la actualidad, existe un creciente interés por el desarrollo de ingredientes funcionales de origen natural debido a la demanda de alimentos con propiedades antioxidantes y beneficios para la salud. No obstante, los compuestos bioactivos presentes en materias primas vegetales son sensibles a factores ambientales, lo que limita su aplicación en la industria alimentaria. De esta forma, en el presente trabajo se evaluó la capacidad antioxidante del extracto de oca (*Oxalis Tuberosa* Mol.) microencapsulado mediante secado por aspersión, se empleó un diseño factorial considerando como factores la relación sólido: solvente y el tiempo de extracción, el contenido de polifenoles total se determinó mediante el método de Folin-Ciocalteu y la capacidad antioxidante se evaluó mediante el ensayo DPPH. Los resultados demostraron que la relación, sólido: solvente fue el factor con mayor influencia significativa con respecto a la recuperación de polifenoles, las condiciones óptimas de extracción se obtuvieron con una relación 1:25 y un tiempo 45 minutos utilizando etanol en una concentración de 50 por ciento como solvente hidroalcohólico. Bajo estos parámetros se alcanzó un contenido de polifenoles totales de 13.206 miligramos equivalentes de ácido gálico por gramo de muestra. La eficiencia de microencapsulado fue 63,42 por ciento, mientras que el rendimiento del proceso de secado por aspersión alcanzó 85,43 por ciento, además, el extracto microencapsulado presentó una capacidad antioxidante de 10.90 micromoles equivalentes de Trolox por gramo de muestra, evidenciando la viabilidad tecnológica del microencapsulado para su incorporación en formulaciones alimentarias con propiedades antioxidantes.

Palabras clave: Cultivo andino, polifenoles, capacidad antioxidante, microencapsulación, secado por aspersión, ingrediente funcional.

ABSTRACT

Currently, there is a growing interest in the development of functional ingredients of natural origin due to the demand for foods with antioxidant properties and health benefits. However, the bioactive compounds present in plant-based raw materials are sensitive to environmental factors, which limits their application in the food industry. Therefore, in this study, the antioxidant capacity of microencapsulated oca (*Oxalis Tuberosa* Mol.) extract was evaluated using spray drying. A factorial design was employed, considering the solid-to-solvent ratio and extraction time as factors. The total polyphenol content was determined using the Folin-Ciocalteu method, and the antioxidant capacity was assessed using the DPPH assay. The results showed that the solid-to-solvent ratio was the factor with the greatest significant influence on polyphenol recovery. The optimal extraction conditions were obtained with a 1:25 ratio and a 45-minute extraction time using 50% ethanol as the hydroalcoholic solvent. Under these parameters, a total polyphenol content of 13,206 milligrams of gallic acid equivalents per gram of sample was achieved. The microencapsulation efficiency was 63.42 percent, while the spray-drying process yield reached 85.43 percent. Furthermore, the microencapsulated extract exhibited an antioxidant capacity of 10.90 micromoles of Trolox equivalents per gram of sample, demonstrating the technological viability of microencapsulation for its incorporation into food formulations with antioxidant properties.

Keywords: Andean crop, polyphenols, antioxidant capacity, microencapsulation, spray drying, functional ingredient.

CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO

1. Antecedentes Investigativo

1.1.1 Justificación

La oca (*Oxalis tuberosa* Mol.) es un tubérculo andino de relevancia agrícola y cultural en el Ecuador debido a su valor nutricional y especialmente por poseer compuestos bioactivos como flavonoides, polifenoles y carotenoides los cuales atribuyen actividad antioxidante. Estas propiedades la posicionan como una materia prima valiosa para el desarrollo de alimentos funcionales y nutraceuticos, sin embargo, su potencial funcional sigue siendo subestimado, lo cual dificulta su integración en procesos de innovación alimentaria (Gamboa et al., 2021).

La aplicación directa del extracto de oca (*Oxalis tuberosa* Mol.) aun no dispone de suficiente evidencia sobre el comportamiento de sus antioxidante ni tampoco sobre su estabilidad cuando son expuestos a condiciones de procesamiento, debido a que en los extractos vegetales, compuestos fenólicos y pigmentos se degradan fácilmente con el cambio de pH, temperatura, entre otros factores como el oxígeno, luz y humedad, lo que provoca una degradación rápida y una disminución de su actividad antioxidante (Castañeda & Perea, 2020).

Para Flores et al., (2022) la microencapsulación mediante secado por aspersión es una tecnología que amplía sus posibilidades para aplicaciones industriales ya que permite proteger compuestos bioactivos sensibles del extracto vegetal en una matriz protectora de manera eficiente, lo cual permitirá aumentar su estabilidad, sin embargo, no se dispone de evidencia solida en cuanto estudios que evalúen el efecto de esta técnica sobre el extracto de oca específicamente con su capacidad antioxidante.

El interés global en alimentos funcionales y en ingredientes naturales con propiedades antioxidantes ha crecido considerablemente durante la última década, impulsando la búsqueda de fuentes vegetales ricas en compuestos bioactivos como la oca, el cual es un recurso andino de alto potencial, sin embargo, su valorización ha sido insuficiente debido a la escasez de estudios científicos que respalden su uso industrial más allá del consumo tradicional, es por eso que la microencapsulación mediante secado por aspersión es una alternativa que permite estabilizar y proteger los antioxidantes del extracto vegetal, además, promueve el desarrollo de nuevos productos funcionales a partir de recursos locales (Mendoza et al., 2020).

1.1.2. Fundamentación científica-técnica

1.1.2.1. Origen de la oca (*Oxalis tuberosa* Mol.)

La oca (*Oxalis tuberosa* Mol.) es un tubérculo andino conocido como ibia, apiña o papa oca de origen precolombino, se cultiva en la puna de los andes centrales y meridionales, además, su domesticación y diversificación se ha registrado en regiones de Perú, Bolivia y Ecuador, donde existe una variedad de morfologías con respecto a su tamaño, color, forma y pulpa. Su valor ancestral y nutricional radica a su adaptabilidad y elevado contenido de carbohidratos, principalmente almidón, que proporciona energía, además aporta fibra dietética que ayuda al adecuado tránsito intestinal y al control de la glucemia (Areche et al., 2022).

Asimismo, la oca posee cantidades notables de vitamina C, compuestos fenólicos y flavonoides, los cuales le confieren propiedades antioxidantes capaces de neutralizar radicales libres y reducir el estrés oxidativo, proceso asociado con el envejecimiento celular y diversas enfermedades crónicas.

1.1.2.2. Taxonomía

Tabla 1. *Taxonomía de oca (*Oxalis tuberosa* Mol.).*

Categoría taxonómica	Clasificación
Reino	<i>Plantae</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Subdivisión	<i>Tracheophyta</i>
Clase	<i>Magnoliopsida</i>
Orden	<i>Geraniales</i>
Familia	<i>Oxalidaceae</i>
Genero	<i>Oxalis</i>
Especie	<i>Oxalis tuberosa</i> Mol.

Fuente: Martinez Roca, (2024).

1.1.2.3. Descripción botánica

Es una especie herbácea de lapso anual que, normalmente, alcanza una altura comprendida entre 0,2 y 0,4 m. Sus tallos poseen forma cilíndrica y exteriorizan un diámetro aproximado de 0,5 a 1,5 cm, estos se originan desde la base de la planta, proporcionándole una morfología cónica.

Las hojas son características, de tipo trifoliado, con tallos de longitud voluble que oscilan entre 2 y 9 cm, y muestran una coloración verde con púrpura, las flores se agrupan en inflorescencias distribuidas en cimas de 4 a 5 unidades, con un cáliz compuesto por cinco sépalos y una corola formada igualmente por cinco segmentos (Martínez Roca, 2024).

1.1.2.4. Distribución geográfica

Este tubérculo es denominado comúnmente como “oca” en países como Bolivia, Chile, Perú, Argentina y Ecuador; en Colombia toma el nombre de “ibia”, mientras que en Venezuela es distinguida como “cuiba”, “quiba” o “ciuva”, y en México se denomina como “papa roja” o “extranjera”. En lengua quechua, su denominación habitual es “oqa”. Por otra parte, la mayor diversidad de esta especie se agrupa en los valles de Cusco y Ayacucho, así como en el altiplano de Bolivia. (Martínez Roca, 2024).

En Ecuador, la oca forma parte fundamental de los cultivos y su distribución se concentra principalmente en la región Sierra, donde las condiciones agroecológicas favorecen su desarrollo, en el cantón Ambato, concretamente en la parroquia rural Santa Rosa, ubicación donde se aplicará la investigación del presente trabajo de investigación, la oca se cultiva en zonas de altitud media y alta, caracterizadas por climas templados y fríos, suelos de origen volcánico y una evidente presencia de lluvia, las mismas condiciones permiten un adecuado crecimiento y formación de tubérculos de buena calidad.

Además, la producción de oca en Ecuador está asociada a sistemas agrícolas familiares y de pequeña escala, en los que se combina con otros cultivos tradicionales, formando parte de prácticas tradicionales de policultivo. Su adaptación a suelos de fertilidad moderada y su tolerancia a temperaturas bajas la convierten en un recurso estratégico local.

1.1.2.5. Composición nutricional

Según, Pico et al., (2022) señalan que los tubérculos se caracterizan por ser una fuente de almidón, si bien la papa es utilizada comúnmente con este propósito, no es el único tubérculo que aporta este tipo de carbohidrato. Diversos tubérculos andinos representan opciones emergentes con alto potencial, de esta forma, la oca se presenta como una excelente elección

ya que también se caracterizan por presentar baja permeabilidad al oxígeno, adecuada transparencia, ausencia de olor y propiedades estructurales con buena resistencia.

Zhu y Cui (2020) señalan que la oca constituye una fuente novedosa de almidón, y que se han evaluado las propiedades químicas y físicas obtenidas, de dos cosechas de este tubérculo, de esta forma, los resultados demostraron que las pastas elaboradas con almidón de oca presentan varias características como la viscosidad y su superior elasticidad respecto a las elaboradas con papa.

Finalmente, Sánchez et al. (2022) señalan que entre las primordiales cualidades nutricionales de la oca sobresale su alto contenido de vitamina C, el cual puede llegar a ser mayor que el de la papa, así como su aporte significativo de carbohidratos que funcionan como fuente energética, presencia de ácido oxálico, un compuesto carboxílico, responsable de su sabor poco agradable, sin embargo, este puede disminuirse mediante la exposición al sol.

1.1.2.6. Composición química

La *Oxalis Tuberosa* Mol. es un tubérculo andino cuya composición química se caracteriza por su alto contenido de humedad y carbohidratos, además, por aportar proteína, fibra, extracto etéreo y cenizas en menor proporción. Asimismo, aporta minerales como fósforo, calcio, hierro y cinc, así como vitaminas, destacando la vitamina C y las vitaminas del complejo B. Estos componentes se presentan en la Tabla 2, donde se expresa las cantidades correspondientes a 100 g de material fresco (Vera et al., 2018).

Tabla 2. Composición química de la oca por 100 g de material fresco.

Componente	Contenido
Humedad (g/100 g)	86,79
Proteína (g/100 g)	0,77
Extracto etéreo (g/100 g)	0,47
Fibra cruda (g/100 g)	0,78
Carbohidratos (g/100 g)	10,41
Cenizas (g/100 g)	0,78
Fósforo (mg/100 g)	28,20
Hierro (mg/100 g)	12,53

Calcio (mg/100 g)	17,18
Cinc (mg/100 g)	1,79
Vitamina A (UI/100 g)	0,99
Vitamina B1 (mg/100 g)	0,05
Vitamina B2 (mg/100 g)	0,94
Vitamina B3 (mg/100 g)	1,09
Vitamina B12 (mg/100 g)	0,91
Vitamina C (mg/100 g)	39,68

Nota. Composición química de la oca por 100 gramos de material fresco. 1 UI vitamina C = 50 μ g (0,05 mg) de vitamina C; 1 mg B12 = 1000 μ g de vitamina B12. **Fuente:** León Marroú et al. (2011).

1.1.2.7. Alimentos funcionales

En términos generales, Zapata, (2020) señala que los alimentos funcionales se definen como aquellos que, además de cumplir con su función nutricional básica, presentan propiedades extra que resultan beneficiosas para la salud del consumidor, más allá de su contenido tradicional de nutrientes, por consiguiente, estos alimentos incorporan ingredientes o compuestos bioactivos capaces de ejercer efectos efectivos en la salud y la reducción del riesgo de ciertas enfermedades.

De este modo, los alimentos funcionales no solo buscan engrandecer su calidad nutricional, sensorial y técnica, sino también promover el bienestar integral del consumidor, contribuyendo a una alimentación más saludable y preventiva.

1.1.2.8. Alimentos ricos en antioxidantes

Diversas materias primas de origen vegetal contienen concentraciones relevantes de compuestos antioxidantes naturales, los cuales desempeñan un papel importante en la protección celular, el consumo de estos productos vegetales ya sea en su forma fresca, como extractos, jugos o ingredientes procesados, se considera una alternativa saludable para incrementar la ingesta de antioxidantes naturales y favorecer la reducción del estrés oxidativo, fortaleciendo así los mecanismos de defensa del organismo según, Pino, & Vergara, (2022).

1.1.2.9. Antioxidantes

De acuerdo con Avello y Suwalsky, (2006) un antioxidante se define como una molécula que tiene la capacidad de retrasar o evitar la oxidación de otras sustancias, en la parte química, la oxidación corresponde a una semirreacción en la cual una molécula disipa electrones, lo que ocurre dentro de un proceso de óxido-reducción (redox). Este proceso puede ser mejorado por mecanismos con la formación de radicales libres, los cuales son especies inestables con electrones desapareados que generan reacciones en cadena.

Estas reacciones pueden volverse incontrolables si existe suficiente sustrato disponible, provocando daños en diversos componentes celulares, especialmente en aquellos de naturaleza lipídica. Los antioxidantes actúan deteniendo este proceso al reaccionar con los compuestos intermedios y bloquear la continuidad de dichas reacciones, limitando así su efecto nocivo.

1.1.2.10. Polifenoles

Los polifenoles son compuestos bioactivos de origen natural que se encuentran principalmente en plantas y se caracterizan por poseer múltiples grupos fenólicos en su estructura química, por lo tanto, son considerados como metabolitos secundarios, es decir, sustancias que las plantas crean como una forma de defensa frente a factores de estrés ambiental como la radiación solar, plagas, patógenos y condiciones ambientales adversas.

Los polifenoles se caracterizan por poseer una alta capacidad antioxidante y antiinflamatoria, de acuerdo con, Li et al., (2014) el estudio de estos compuestos y su impacto en la salud humana ha sido ampliamente abordado, demostrando que se asocian con múltiples beneficios, entre los que destacan la protección celular y la contribución a la prevención de varias enfermedades.

1.1.2.10.1 Beneficio del consumo de compuestos polifenólicos

Actualmente existe un creciente interés del consumo de compuestos antioxidantes debido a los beneficios que ofrecen para la salud, especialmente de polifenoles de origen vegetal. Según Li et al. (2024) estudios recientes han demostrado como estas interacciones modifican la composición microbiana intestinal y los metabolitos que producen los microorganismos.

Además, los polifenoles presentan diferentes actividades biológicas que influyen en el sistema gastrointestinal produciendo metabolitos bioactivos que son más biodisponibles.

Las actividades metabólicas de la microbiota intestinal influyen en la eficiencia de los polifenoles, en este sentido, solo una pequeña proporción de polifenoles ingeridos se absorbe en el intestino delgado, mientras que la mayor proporción llega al colon donde se produce metabolitos con distintas actividades biológicas, los cuales favorecen el crecimiento de microorganismo beneficiosos y, al mismo tiempo, inhibir el desarrollo de especies patógenas (Voss et al., 2022).

Para Rana et al. (2022), la ingesta de polifenoles contribuye a reducir el estrés oxidativo, el cual se produce por un desequilibrio entre la generación de radicales libres y los mecanismos antioxidantes del organismo. Este desequilibrio puede provocar daño celular y favorecer el desarrollo de enfermedades crónicas. Además, los polifenoles actúan a través de distintos mecanismos biológicos que permiten prevenir enfermedades relacionadas con procesos degenerativos y el envejecimiento.

1.1.2.11. Microencapsulación

La microencapsulación puede ser utilizada para múltiples aplicaciones en distintos sectores, destacándose su uso en la industria alimentaria, cosmética, farmacéutica, textil y metalúrgica, entre otros, debido a su capacidad para mejorar la protección, liberación controlada y vida útil de los compuestos encapsulados.

Según Reyna et al., (2015), la microencapsulación es un proceso mediante el cual una sustancia activa es revestida por una pared protectora de textura porosa, formando así cápsulas pequeñas, por medio de esta técnica, diversos compuestos biológicamente activos, como enzimas, microorganismos y vitaminas, pueden ser encapsulados con el fin de resguardarlos frente a condiciones ambientales hostiles, preservando su funcionalidad y estabilidad.

Entre sus beneficios más importantes se enfatiza su capacidad para ocultar sabores y aromas no deseados de los compuestos encapsulados, además de proteger los ingredientes bioactivos frente a procesos de oxidación y reacciones indeseables, de esta forma, este proceso ofrece

resguardo contra factores como la luz, el calor y ciertos gases, contribuyendo así a prolongar la vida útil de los productos (Esquivel et al., 2015).

Tipos de microcápsulas:

- **Núcleo simple:** El agente bioactivo se encuentra en la fase interna, la cual está recubierta por una pared polimérica, actúa como una barrera protectora frente a agentes externos como la luz, el oxígeno, variaciones térmicas, humedad y otros factores ambientales, por lo tanto, permite preservar la estabilidad funcional del encapsulado. Este tipo de encapsulación se utiliza para mantener un mayor rendimiento durante el proceso y para aislar el compuesto bioactivo completamente, sin embargo, la presencia de poros en la pared encapsulante compromete la integridad de la microcápsula (Tangarife et al., 2021).
- **Multinúcleo:** Las microcápsulas multinúcleo se caracterizan por poseer múltiples dominios internos del compuesto bioactivo dispersos dentro de la misma cubierta polimérica externa. Según Reyna et al. (2015), cada núcleo encapsulado puede comportarse como una microunidad, pero todos permanecen confinados en una estructura similar. Este tipo de microcápsula mejora la distribución del compuesto activo, además, favorece el mecanismo de liberación gradual.
- **Matriz:** El compuesto bioactivo no se encuentra en un núcleo específico, este se encuentra distribuido uniformemente en la red polimérica que conforma la estructura del encapsulante. Para Tangarife et al. (2021), el metabolito se encuentra retenido dentro de la matriz polimérica, es decir, que el metabolito está atrapado y distribuido uniformemente en toda la estructura interna de la cápsula. Sin embargo, una cierta parte puede quedar en la superficie de la partícula, disminuyendo la eficiencia de microencapsulación y aumentando la susceptibilidad a oxidación.

1.1.2.11.1. Secado por aspersión

De forma general, existen diversas técnicas para llevar a cabo el proceso de microencapsulación; no obstante, el secado por aspersión se ha establecido como uno de los métodos más utilizados en la industria alimentaria, debido a las ventajas que ofrece en términos de eficiencia y protección de los compuestos sensibles. Este procedimiento resulta

especialmente adecuado cuando se busca conservar sustancias con actividad antioxidante que forman parte de una matriz alimentaria (Esquivel et al., 2015).

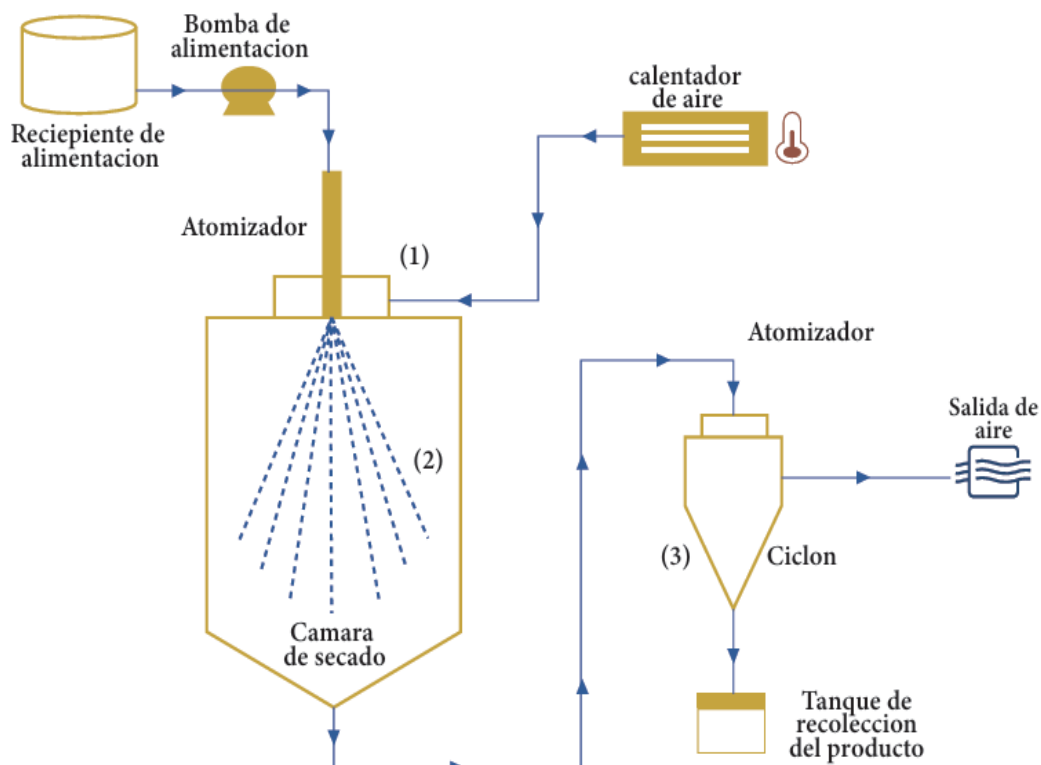
El secado por aspersión es una técnica que se caracteriza por su capacidad para descartar rápidamente la humedad, de esta forma, se da manteniendo al mismo tiempo temperaturas bajas en las partículas procesadas, en este método, la elaboración de microcápsulas se enfoca en la homogeneización del material del núcleo, que corresponde a los compuestos bioactivos, junto con los materiales de recubrimiento, como polisacáridos y proteínas, con el fin de crear una emulsión que posteriormente es atomizada dentro de una cámara de secado.

La aplicación de este procedimiento permite tratar materiales líquidos sensibles al calor sin afectar su calidad ni sus propiedades funcionales, además de ser un proceso continuo, eficiente y de bajo costo operativo. Asimismo, se ha indicado que el daño ocasionado por altas temperaturas es mínimo, debido a los cortos tiempos de exposición durante el proceso (Tangarife et al., 2021).

La figura 1 muestra el proceso de secado por aspersión, el cual consiste en la alimentación de una mezcla compuesta por el metabolito de interés y el agente encapsulante hacia un atomizador. En esta etapa ocurre la conversión de gota a partícula, las cuales entran en contacto con una corriente de aire caliente, dando lugar a la conversión de gota a partícula. Para Espinosa (2017), cuando la corriente de aire es paralela la temperatura de entrada es entre 150 a 200°C, y la temperatura de salida oscila entre 50 a 80°C, lo que favorece la dispersión del polvo.

Por otro lado, en un sistema contracorriente, la muestra se expone a temperaturas más elevadas. En una etapa específica del proceso, el contenido de agua se mantiene constante, lo que favorece la formación de una corteza seca del material microencapsulante en la superficie de la gota, el proceso termina cuando la temperatura del polvo tiene un valor similar al de la corriente de aire (Santos, 2017).

Figura 1. Diagrama sobre el mecanismo de secado por aspersión.



Nota. Tomado de *Biomateriales: Física y química (nueva edición)*, por D. Santos et al., 2017, IntechOpen.

1.1.2.11.2. Sustancias utilizadas en el recubrimiento en la microencapsulación

La elección del material o sustancia de recubrimiento depende principalmente de las necesidades del sistema, por lo tanto, el método de microencapsulación empleado y las condiciones ambientales a las que estarán expuestas las microcápsulas deben ser seleccionadas previamente. Los rasgos fisicoquímicos de los microencapsulados están determinados en gran medida por el recubrimiento elegido, ya que este debe tener la capacidad de formar membranas uniformes y estables que se integren adecuadamente con la fase del núcleo.

Asimismo, el material de cobertura debe presentar propiedades concretas como resistencia mecánica, permeabilidad, flexibilidad, capacidad de absorción de humedad y luz, adecuada solubilidad y estabilidad durante su almacenamiento y aplicación. Para la formación de la matriz encapsulante se utilizan diversos materiales, entre los cuales destacan los derivados de

la celulosa, lípidos, proteínas, gomas, carbohidratos y ciertos compuestos inorgánicos, considerados fundamentales por su capacidad funcional y protectora (Reyna et al., 2015).

1.2 Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Evaluar la capacidad antioxidante del extracto de oca (*Oxalis tuberosa* Mol.) microencapsulado mediante secado por aspersión y su potencial como ingrediente funcional

1.2.2. Objetivos específicos

- Extraer los polifenoles de la oca (*Oxalis tuberosa* Mol.)
- Obtener el microencapsulado del extracto de la oca (*Oxalis tuberosa* Mol.) mediante la técnica de secado por aspersión.
- Determinar la capacidad antioxidante del extracto microencapsulado por el método DPPH (2,2 difenil- 1- picrilhidracilo).

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

Tabla 3. *Recursos materiales.*

Material	Cantidad
Material Vegetal	
Tubérculo “oca”	500 g
Reactivos de laboratorio	
Reactivo de Folin-Ciocalteu	5g
DPPH	2 g
Trolox	2 g
Fenolftaleína	20mL
Hidróxido de sodio	5g
Carbonato de sodio	10g
Ácido cítrico	300mL
Etanol	3L
Maltodextrina	70 g
Agua Destilada	10L
Metanol	10L
Material de laboratorio	
Balón de aforo (100 ml)	3
Vasos de precipitado de (100ml)	3
Probeta plástica de (100ml)	3
Gradilla	1
Mortero y pistilo	1
Caja de bolsas plásticas herméticas	1
Placa de (96 porillos)	1
Matraces	2
Equipos de laboratorio	
Desecador	1
Balanza analítica	1
Mufla	1
Estufa	1

Refractómetro digital	1
Potenciómetro	1
Balanza de humedad	1
Espectrofotómetro UV – VIS	1
Espectrofotómetro Infrarrojo	1
Mini Spray Dryer	1
Rotavapor	1
Centrífuga	1
Licuada	1

Realizado por: Criollo J, 2025.

2.1 Métodos

2.1.1. Recolección del material vegetal

La cosecha del tubérculo *Oxalis tuberosa* Mol. se realizó en la parroquia de Santa Rosa, cantón Ambato, provincia de Tungurahua situada aproximadamente en las coordenadas 1°16'S 78°37'O, a una altitud cercana a los 2972 metros sobre el nivel del mar, de esta forma, los tubérculos fueron recogidos en su punto óptimo de madurez y, a continuación, el material vegetal cosechado fue almacenado en recipientes plásticos secos, manteniéndose a temperatura ambiente para su conservación.

2.1.2. Preparación del tubérculo

Las ocas cosechadas fueron sometidas a una limpieza con agua potable para remover residuos de tierra y otras impurezas superficiales. Posteriormente, los tubérculos de *Oxalis tuberosa* Mol. fueron deshidratados a una temperatura de 60 °C durante un periodo de 18 horas, con el fin de reducir su contenido de humedad de forma efectiva. Una vez finalizado el proceso de secado, el material fue triturado utilizando una licuadora hasta conseguir una harina de textura fina, la cual fue posteriormente almacenada en bolsas plásticas herméticas para asegurar la adecuada conservación del producto.

2.1.3. Determinación de pH y acidez titulable del tubérculo

De acuerdo con las directrices establecidas en las normas, **NTE INEN-ISO 1842 (2013)** y **NTE INEN-ISO 750 (2013)**, se procedió a evaluar el pH y la acidez titulable de las muestras. La medición del pH se efectuó de manera directa mediante un potenciómetro digital (Mettler Toledo, modelo SevenCompact). Por otro lado, la determinación de la acidez titulable se realizó utilizando un titulador potenciométrico (Mettler Toledo G20 – Titrator Compact), empleando una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0,1 N hasta alcanzar condiciones de neutralidad. Para ambos análisis, se pesaron 5 g de muestra que fueron disueltos en 45 mL de agua destilada, realizándose el procedimiento por triplicado para garantizar la reproducibilidad de los resultados (Moreno & Deaquiz,2016).

El porcentaje de acidez se dedujo mediante la ecuación:

$$\% \text{Acidez titulable} = \frac{A * B * C}{D} * 100$$

Ecuación 1. *Determinación de acidez titulable.*

Donde:

A: Volumen gastado de NaOH (ml)

B: Normalidad de NaOH empleado en la titulación (0.1N)

C: Peso miliequivalente del ácido (meq)

D: Peso en gramos de la muestra utilizada

(Moreno & Deaquiz,2016).

2.1.4. Determinación de sólidos solubles del tubérculo

Por medio de lo establecido en la norma **NTE INEN-ISO 2173 (2013)**, se procedió a calcular el contenido de sólidos solubles, realizando el estudio por triplicado, preliminarmente, se efectuó la limpieza del lente con agua destilada, inmediatamente, se colocaron directamente sobre el lente del refractómetro digital (modelo ATAGO Pocket) de dos a tres gotas del ejemplar. Finalmente, se observó y registro el resultado expresado en grados °Brix (Moreno & Deaquiz,2016).

2.1.5. Extracción de polifenoles

2.1.5.1 Selección del disolvente químico óptimo para la extracción de compuestos polifenólicos

Con el objetivo de identificar la combinación de solventes más eficaces, se llevó a cabo un diseño experimental de mezclas con diferentes proporciones de agua destilada y etanol al 96%, se fundamentó en la metodología reportada por Sandoval (2026), la cual fue adaptada de acuerdo con los requerimientos del presente estudio. Por consiguiente, se trabajó con distintas concentraciones de etanol del 30%, 50% y 70%. Adicionalmente se incorporó un control positivo (96% etanol) y negativo (0%etanol) para efectos comparativos. Inicialmente, las muestras se prepararon en una relación sólido-solvente de 1:20, es decir, se pesaron 5 g de material vegetal previamente acondicionada y, se distribuyó en 5 vasos de precipitación de 200 ml, por consiguiente, se adicionó a cada vaso 100 ml del solvente correspondiente, medidos con una probeta (Peñaloza, 2022).

Después de preparar las muestras, cada una fue sometida a un tratamiento térmico a 78,2 °C, aplicándoles una agitación constante de 7000 rpm durante un periodo de 30 minutos utilizando planchas de calentamiento. Una vez culminado este proceso, las muestras fueron colocadas en frascos ámbar con el objetivo de evitar la degradación de los compuestos polifenólicos, de esta forma, las muestras se colocaron en tubos falcón de 50 ml registrando previamente su masa y fueron centrifugadas a 4500 rpm en un tiempo de 20 minutos a 20°C. Al culminar el tiempo se obtuvo la obtención del sobrenadante, cuyo volumen fue cuantificado mediante probetas de 100 ml (Caizaguano, 2025).

Consecuentemente, el sobrenadante obtenido se usó para determinar el contenido de humedad mediante una balanza infrarroja. A partir de los resultados expresadas por el equipo en porcentaje, se calculó el contenido de sólidos totales restando este valor al 100%. Posteriormente, este resultado se multiplicó por el volumen del sobrenadante, con el fin de obtener la masa de sólidos extraídos.

Por consiguiente, para obtener el contenido de polifenoles, se empleó el método de Folin-Ciocalteu. Para ello, se tomaron 25 µl de muestra y se mezcló con 100 µl del reactivo de Follin dejándose en reposo durante 5 minutos. Culminado el tiempo, se añadieron 75 µl de carbonato

de sodio al 7,5%, y se llevó a incubar durante 2 horas, con el propósito de favorecer el desarrollo de la reacción. Al terminar el tiempo de incubación, se midió la absorbancia en un espectrofotómetro UV-Vis a una longitud de onda de 765 nm (Peñaloza, 2022).

Finalmente, los valores de la absorbancia obtenidos mediante el espectrofotómetro se sustituyeron en la variable “y” de la ecuación de la curva de la calibración del ácido gálico, con el fin de determinar la concentración de polifenoles correspondiente a cada una las diferentes concentraciones de etanol, expresada en la variable “x”.

$$M_{se1} * V_{s1} = M_x * V_{O2}$$

Ecuación 2. *Cálculo de concentración de extracto.*

Donde:

M_{se1} = masa de sólidos extraídos (mg)

V_{s1} = volumen total de sobrenadante (ml)

M_x = masa de sólidos presentes $\left(\frac{mg}{ml}\right)$

V_{O2} = volumen de referencia (ml)

$$M_{cc} = M_x * M_{cp}$$

Ecuación 3. *Corrección de contenido polifenólico.*

Donde:

M_{cc} = masa de contenido corregido $\left(\frac{ug}{mL}\right)$

M_x = masa en 1 ml de extracto calculado $\left(\frac{ug}{mL}\right)$

M_{cp} = masa respectiva de la curva de calibración $\left(\frac{ug}{mL}\right)$

$$mg \frac{GAE}{G} = \frac{GAE * V}{W}$$

Ecuación 4. *Determinación de contenido polifenólico total.*

Donde:

$mg \frac{GAE}{G}$ = miligramos de GAE por cada gramo extraído seco

GAE = masa de contenido corregido GAE $\left(\frac{mg}{ml}\right)$

V = volumen total de la muestra (ml)

W = peso de la muestra (g)

2.1.5.2. Curva de calibración con ácido gálico.

Se elaboró una curva de calibración con base en la metodología descrita por Sandoval (2026), empleando soluciones estándar de ácido gálico en un rango de 0 a 200 $\mu\text{g/ml}$, a partir de una solución stock de 1 mg/ml. Cada estándar de ácido gálico reaccionó con 100 μL del reactivo de Follin (1 N) transcurrido 5 minutos, se añadieron 75 μL carbonato de sodio al 7,5%, de esta forma, las mezclas se incubaron durante 2 horas.

Finalizando el tiempo de incubación se midió la absorbancia a 765 nm en un espectrofotómetro UV-Vis. Con los datos obtenidos mediante se construyó una gráfica de dispersión en Excel, a partir de la cual se determinó la ecuación de la recta y el coeficiente de determinación R^2 . Estos parámetros (absorbancia vs concentración de las soluciones estándar) se emplearon para la cuantificación de polifenoles.

2.1.5.3. Cuantificación del contenido polifenólico mediante la técnica de Follin Ciocalteu

Después de seleccionar el mejor solvente, se procedió a evaluar cada uno de los tratamientos establecidos en el diseño experimental 3². En una microplaca de 96 pocillos se añadieron 25 μL de la muestra con 100 μL de reactivo Follin-Ciocalteu (1N) y, tras 5 minutos de reposo a temperatura ambiente, se agregaron 75 μL de carbonato de sodio al 7,5%, completando un volumen de 200 μL , las muestras se mantuvieron en incubación durante 2 horas para favorecer el desarrollo de la reacción. Este procedimiento se basó en la metodología descrita por Sandoval (2026). Finalmente, se colocó la microplaca en el espectrofotómetro UV-Vis a 765 nm para medir la absorbancia de cada tratamiento, cabe recalcar que se realizó por triplicado.

2.1.6. Diseño experimental 3² para la extracción de polifenoles.

Una vez determinado la mezcla más adecuada, se llevó a cabo un diseño experimental en la cual se evaluaron dos variables: material vegetal-volumen (1:15, 1:20 y 1: 25) con un tiempo

de extracción bajo agitación de 7000 rpm (30, 45 y 60 minutos), además, cada condición experimental se realizó por triplicado.

Tabla 4. *Niveles experimentales.*

Relación	Tiempo (min)
1:15	30
1:20	45
1:25	60

Tabla 5. *Condiciones y corridas de diseño experimental propuesta.*

Muestra	Relación	Tiempo (min)
1	1:15	30
2	1:15	45
3	1:15	60
4	1:20	30
5	1:20	45
6	1:20	60
7	1:25	30
8	1:25	45
9	1:25	60

A partir de este diseño, se identificó el mejor tratamiento con respecto al mayor contenido polifenólico para un proceso de extracción eficaz, por lo tanto, se realizó el mismo proceso para identificar el contenido de polifenoles. Se utilizaron 25 μL de la muestra con 100 μL del reactivo de Follin y 75 μL de carbonato de sodio al 7,5%. Los cuales fueron colocados en el espectrofotómetro UV-Vis a 765 nm (Fernández et al., 2021).

Una vez determinado el tratamiento más óptimo en función del contenido polifenólico, se procedió a aplicación a mayor escala, obteniéndose un volumen total de 2 litros de sobrenadante correspondiente al tratamiento seleccionado. El volumen obtenido fue almacenado en frascos ámbar con la finalidad de minimizar procesos de degradación fotoquímica y preservar la estabilidad de los compuestos fenólicos presentes en el extracto. Posteriormente, con la cantidad obtenida fue sometida a un proceso de concentración mediante

el equipo de rotavapor, acoplado a una bomba de vacío, un condensador y un baño maría con agua destilada, además, el sistema operó a condiciones de 71°C con una velocidad de 230 rpm (Cayambe & Castañeda, 2019). Asimismo, el sistema de vacío se mantuvo constantemente durante todo el proceso, con el fin de obtener un extracto con mayor concentrado.

2.1.7. Determinación de sólidos totales del extracto de la Oca (*Oxalis tuberosa* Mol.)

El porcentaje de humedad del extracto de oca *Oxalis tuberosa* Mol. fue valorado mediante el uso de una balanza de humedad, instrumento que consiente en cuantificar la disminución de masa producida por la evaporación al exteriorizar la muestra a una temperatura regulada. Con base en el valor obtenido de humedad, se determinó el contenido de sólidos totales presentes en la muestra aplicando la ecuación correspondiente a lo señalado por Rodríguez (2012).

$$\% \text{ Sólidos Totales} = 100 - \% \text{ Humedad}$$

Ecuación 5. *Determinación de sólidos totales.*

2.1.8. Microencapsulación de los compuestos bioactivos mediante secado por aspersión

Con el concentrado obtenido anteriormente, se preparó una mezcla homogénea formada por 20 ml del extracto, 25 g de maltodextrina y 90 ml de agua destilada hasta obtener una dispersión uniforme. Además, se verificó que todas las partículas estuvieran disueltas con el fin de evitar la obstrucción del sistema de alimentación del equipo (Sotomayor et al., 2017).

Posteriormente, se establecieron las condiciones de operación del spray dryer Büchi B-290 Mini Spray Dryer, a una presión de 60000 Pa, con un caudal de alimentación de 4 mL/min, a una temperatura de entrada de 150°C y un caudal de aire de 0,010 m²/s. El extracto fue transportado hacia el atomizador a través de una manguera mediante el accionamiento de una bomba peristáltica y, posteriormente, ingresó a la cámara primaria, de esta forma, las partículas de mayor peso y los residuos quedaron retenidos, mientras que aquellas que exhibieron el tamaño y peso adecuados fueron recolectadas en la cámara de salida a 70°C. Por último, una vez obtenido el microencapsulado se almacenó en una bolsa hermética previamente pesada, además, se retiró la mayor cantidad de aire de la bolsa para reducir la absorción de humedad, el producto se acondicionó a temperatura ambiente (Gazalian et al., 2025).

2.1.8.1. Rendimiento del microencapsulado de extracto de oca (*Oxalis Tuberosa* Mol.)

Para la determinación del rendimiento del microencapsulado, se empleó la ecuación 6, en la cual se relacionó la masa de sólidos obtenidos luego del proceso con la masa de sólidos alimentados al equipo. La masa de sólidos obtenidos correspondió al rendimiento real, es decir, la cantidad de producto recuperado al final del proceso, mientras que la masa de sólidos alimentos representó el rendimiento teórico, calculado a partir de la cantidad inicial de sólidos presentes en la solución de alimentación.

$$R (\%) = \frac{MSO}{MSA} * 100$$

Ecuación 6. *Rendimiento de microencapsulado.*

Donde:

MSO = Masa de sólidos obtenidos fue la cantidad de producto final recuperado después del secado.

MSA = Masa de sólidos alimentados representó la cantidad inicial de sólidos presentes en la solución alimentada al equipo.

2.1.8.2. Eficiencia cuantitativa de la microencapsulación

El procedimiento experimental para evaluar la eficiencia de microencapsulación se basó en la metodología propuesto por Sandoval (2026). Para ello, se prepararon dos muestras utilizando 2 tubos A y B, cada uno bajo condiciones específicas, con el fin de validar la ecuación 4.

En el tubo A (extracción superficial) se pesó 0,2 g de polvo microencapsulado, los cuales se diluyeron en 10 ml de etanol al 96% dentro de un tubo Falcom. Posteriormente, la mezcla se agitó en un vórtex durante 1 minuto a 8000 rpm, a continuación, se centrifugo a 4000 rpm por 2 minutos. El sobrenadante obtenido se recuperó y se analizó mediante el método de Follin-Ciocalteu, utilizando carbonato de sodio al 7,5% en una microplaca, con dos réplicas biológicas y un tiempo de incubación de 90 minutos. Finalmente, las absorbancias se midieron a 765 nm en un espectrofotómetro (Caizaguano Quinfia, 2025).

En el caso del tubo B, se pesaron 0,2 g de polvo microencapsulado y se diluyeron en 10 ml de agua destilada dentro de un tubo Falcom. Posteriormente, se siguió el mismo procedimiento

descrito para el tubo A. En este caso, el tiempo de incubación fue de 40 minutos y las lecturas se realizaron en un espectrofotómetro a 765 nm, los valores obtenidos se emplearon en la ecuación 4 para determinar la eficiencia de microencapsulación.

$$EM (\%) = \frac{PT - PS}{PT} * 100$$

Ecuación 7. *Determinación de eficiencia de la microencapsulación.*

Donde:

EM (%)= Eficiencia de microencapsulación, porcentaje en masa

PT=Principio activo total presente en las microcápsulas (g)

PS=Principio activo superficial en las microcápsulas (g)

2.1.8.3. Espectrofotometría Infrarroja

Este estudio se llevó a cabo por medio de la técnica de espectrofotometría infrarroja (IR), de acuerdo con lo indicado por Cabra (2017), la cual resulta con una alta eficacia para la evaluación de las características físicas y químicas de varios compuestos. En este caso, la espectroscopia infrarroja fue empleada para reconocer y analizar los diferentes espectros presentes en los extractos de *Oxalis tuberosa* Mol. en sus distintas presentaciones: sin encapsular, encapsulados y polimerizados con maltodextrina, permitiendo así comparar sus perfiles estructurales.

2.1.9. Determinar la capacidad antioxidante del extracto microencapsulado por el método DPPH (2,2 difenil- 1- picrilhidracilo).

2.1.9.1. Evaluación de la capacidad antioxidante mediante DPPH

Para la evaluación de la actividad antioxidante mediante el método DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidracilo) se llevó a cabo el análisis en la Unidad de Vinculación de la Universidad Estal de Bolívar, tomando como referencia el método descrito por Mayoral et al. (2019). Este proceso permitió determinar la capacidad antioxidante de una muestra por medio de la reducción del radical DPPH en presencia de compuestos antioxidantes, proceso que se evidencio por un cambio en la coloración y una disminución de la absorbancia.

Para la obtención de los extractos se pesaron 0,5008 mg de muestra y se adicionaron 5 ml de etanol al 70% como solvente extractor, la mezcla fue sometida a agitación en un vortex por 10 minutos y las muestras fueron colocados en un baño ultrasónico con agua destilada por 10 minutos con el objetivo de incrementar la liberación de metabolitos fenólicos, finalizado este tiempo, las muestras se centrifugaron a 6500 rpm durante 10 minutos y el sobrenadante se aforó hasta un volumen final de 25 ml, este procedimiento se realizó por triplicado.

Para determinar la actividad antioxidante, se prepara una solución de DPPH 0,006 mM utilizando etanol como solvente, posteriormente, se mezcló 1950 μ L de solución de DPPH con 50 μ L del extracto de la muestra, se agitó e incubó a temperatura ambiente durante 35 minutos en un lugar oscuro, transcurrido el tiempo de reacción, la absorbancia fue medida a 515 nm en un espectrofotómetro.

La cuantificación de la capacidad antioxidante se efectuó mediante una curva de calibración elaborada con soluciones estándar de Trolox en concentraciones de 200 y 1000 μ mol/L como se observa en el *anexo 12*. Los resultados fueron expresados como μ mol equivalentes de Trolox por gramo de muestra (μ mol Eq. Trolox/g muestra).

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis y discusión de resultados

3.1.1. Caracterización fisicoquímica de la muestra oca (*Oxalis Tuberosa* Mol.)

Tabla 6. Caracterización fisicoquímica del tubérculo (*Oxalis Tuberosa* Mol.).

Parámetro	Unidad	Resultado
pH	-	6,40 $\pm$ 0,10
Sólidos solubles	°Brix	13,90 $\pm$ 0,10
Acidez titulable	% ácido cítrico	0,19 $\pm$ 0,02

Nota. Se realizó por triplicado en estado fresco.

La tabla 6 presenta la caracterización fisicoquímica de la oca (*Oxalis Tuberosa* Mol.), lo cual permite comprender su comportamiento como materia prima. En primer lugar, el pH registrado 6,40 $\pm$ 0,10 indica que la muestra es ligeramente ácida, con un contenido de acidez de 0,19 $\pm$ 0,02 expresado como ácido cítrico. Este comportamiento del tubérculo se atribuye al proceso de maduración, cuyo fin es reducir el contenido de ácido oxálico característico de la oca. Dicho valor se encuentre dentro del rango reportado por Karaogul et al. (2025), los cuales suelen presentar un pH en un rango de (5,5 a 6,8), lo que evidencia concordancia con estudios previos. Además, este nivel de pH contribuye a la estabilidad de los compuestos polifenólicos debido a que condiciones ligeramente ácidas reduce su degradación y favorece la eficiencia de extracción.

En cuanto a los sólidos solubles 13,90 $\pm$ 0,10, este valor indica una concentración elevada de azúcares solubles, atribuida a la exposición del tubérculo al sol, proceso que favorece la hidrólisis enzimática del almidón el almidón transformándolos en azúcares simples, lo que incrementa el dulzor y modifica las propiedades fisicoquímicas del tubérculo. En concordancia con lo reportado por (Xu et al., 2026), este contenido influye en la viscosidad del extracto, afectando la difusión de compuestos bioactivos. En este contexto, al utilizar etanol al 50% como solvente, se establece un equilibrio de polaridad ideal que favorece la solubilización de compuestos de naturaleza intermedia y de compuestos hidrofílicos. Además, crea un gradiente osmótico eficaz entre el interior celular y el medio externo, lo que facilita la salida de los polifenoles desde las vacuolas celulares.

Adicionalmente, se ha demostrado que un contenido alto o moderado de sólidos solubles contribuye a la estabilidad de los compuestos bioactivos, debido a la reducción de agua que limita la degradación oxidativa. Según lo reportado por (Choudhury et al., 2021), señala que una menor actividad de agua reduce la velocidad de reacciones oxidativas, contribuyendo a mantener la estabilidad de los compuestos bioactivos, además, las matrices vegetales con elevado contenido de azúcares solubles exhiben una mayor estabilidad de compuestos bioactivos bajo condiciones de extracción y almacenamiento.

En consecuencia, los valores obtenidos en este estudio sugieren que el tubérculo analizado presenta características fisicoquímicas adecuadas para su utilización como materia prima en la obtención de extractos con elevada capacidad antioxidante. En concordancia con lo reportado por Karaogul et al. (2025), este comportamiento puede explicarse por la sinergia entre estos parámetros como sólidos solubles, pH y acidez, los cuales influyen significativamente en la estabilidad estructural y en la eficiencia del proceso de extracción de compuestos bioactivos, además, estas características fisicoquímicas similares tienden a favorecer la conservación de los compuestos fenólicos.

3.1.2. Selección del disolvente

Figura 2. Efecto de la concentración de etanol en la extracción de polifenoles totales de la oca (*Oxalis Tuberosa* Mol.).

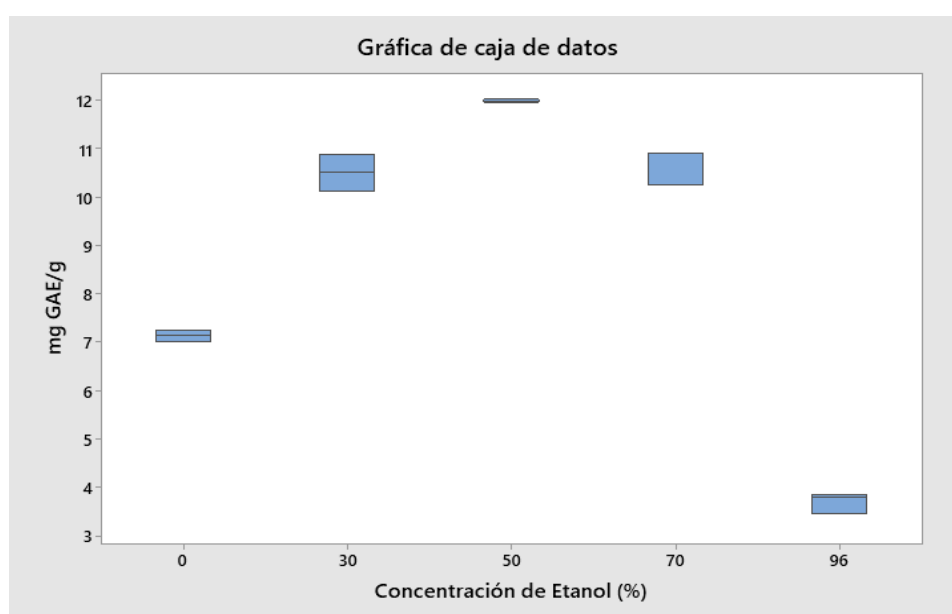


Tabla 7. Cuantificación de polifenoles totales en extractos de oca (*Oxalis Tuberosa* Mol.) según la concentración de etanol.

Mezcla Extractiva	Cantidad $\frac{\text{mg GAE}}{\text{g extracto seco}}$	Desviación estándar $\pm$
Agua destilada (Etanol 0%)	7,141	0,124
Etanol 30%	10,502	0,375
Etanol 50%	11,989	0,032
Etanol 70%	10,690	0,375
Etanol 96%	3,709	0,220

Nota. La determinación de los compuestos polifenólicos fueron calculados a partir de la regresión lineal de una curva estándar de ácido gálico.

Como se observa en la figura 2 y la tabla 7, el mayor rendimiento de compuestos polifenólicos se obtuvo con etanol al 50%, de esta forma, alcanzando un valor de $11,989 \pm 0,032$ mg GAE/g. seguido por el 70% y 30%, mientras que los valores más bajo corresponden al 96%, 3,709 mg GAE/g y el control con 7,141 mg GAE/g. Este comportamiento según Karaogul et al. (2025), depende directamente de la afinidad entre el solvente y los solutos de la muestra, debido a que una mezcla hidroalcohólica intermedia optimiza la solubilización de los compuestos polifenólicos gracias a la formación de puentes de hidrógeno. El uso de mezclas binarias es más efectivo que solventes puros, plasmado en la figura 2, esto se debe a el agua ayuda a hinchar la matriz vegetal y ayuda aumentar el área de contacto, mientras que en el etanol se encarga de romper los enlaces entre la matriz y los solutos (Rocha et al., 2019).

Para Safitri et al. (2026), este comportamiento se debe por la polaridad del solvente, puesto que los polifenoles son compuestos de polaridad intermedia, por lo que requieren solventes tanto polares como apolares, por consiguiente, se sabe que el agua es altamente polar, lo cual limita la extracción de compuestos menos polares mientras que el etanol al 96% reduce su capacidad de solubilizar compuestos más hidrofílicos, por lo que esto sugiere que la mayoría de polifenoles presentes en la oca son de naturaleza hidrofílica, es decir, es un solvente orgánico lo cual no permite solubilizarlos apropiadamente, es por eso que, la mezcla que contiene el 50% de etanol mantiene una estabilidad adecuada lo que permite la ruptura de la matriz y la difusión de los metabolitos (Xu et al., 2026).

El tratamiento al 50% de etanol presenta mayor rendimiento en la extracción de polifenoles, de manera concordante, otros estudios han reportado que las mezclas hidroalcohólicas en un rango de 40% y 70% son óptimas para la extracción de polifenoles, debido a que mejora la penetración del solvente y la solubilidad de los compuestos (Choudhury et al., 2021). De manera similar, Jin et al (2018) menciona que el contenido polifenólico aumenta en concentraciones intermedias de etanol y disminuye en condiciones extremas, además, destaca que usar etanol acuoso ayuda a desnaturalizar las paredes celulares vegetales, lo cual ayuda a liberar los compuestos bioactivos de la oca.

3.1.3. Diseño experimental 3² para la extracción de compuestos polifenólicos

Tabla 8. Efecto de la relación matriz vegetal-solvente y el tiempo de extracción sobre el contenido de polifenoles totales en la oca (*Oxalis tuberosa* Mol).

Tratamientos	Relación	Réplicas	Cantidad	Promedio $\pm$ Desv. Est.
			$\frac{\text{mg GAE}}{\text{g extracto seco}}$	
1	1:15 x 30 min	1	5,869	6,386 $\pm$ 0,470
		2	6,787	
		3	6,501	
2	1:15 x 45 min	1	5,821	6,381 $\pm$ 0,511
		2	6,822	
		3	6,501	
3	1:15 x 60 min	1	5,894	6,336 $\pm$ 0,522
		2	6,912	
		3	6,201	
4	1:20 x 30 min	1	8,925	8,973 $\pm$ 0,375
		2	9,370	
		3	8,625	
5	1:20 x 45 min	1	7,852	8,110 $\pm$ 0,547
		2	8,739	
		3	7,739	
6	1:20 x 60 min	1	8,851	8,748 $\pm$ 0,456
		2	9,144	
		3	8,250	
7	1:25 x 30 min	1	9,104	9,301 $\pm$ 0,174
		2	9,436	
		3	9,364	
8	1:25 x 45 min	1	13,115	13,206 $\pm$ 0,088
		2	13,290	
		3	13,214	
9	1:25 x 60 min	1	10,154	10,872 $\pm$ 0,728
		2	11,609	
		3	10,854	

Al analizar la relación de extracción, se observa en la tabla 8 un incremento progresivo del contenido de polifenoles en los tratamientos con relación 1:25 (tratamientos 7, 8 y 9), destacándose el tratamiento 8 (1:25 por 45 minutos) con un promedio de $13,206 \pm 0,088 \frac{mg\ GAE}{g}$, el mayor de todos los ensayos. Para Jin et al. (2018), de acuerdo con la Ley de Difusión de Fick una mayor cantidad de solvente intensifica la diferencia de concentración lo cual facilita la transferencia de masa desde la matriz vegetal hacia el medio líquido, además, el aumento de la relación sólido; solvente mejora la difusión de compuestos polifenólicos hasta alcanzar un punto de saturación, por otro lado, al extender el tiempo a 60 min (tratamiento 9), el contenido de polifenoles desciende a $10,872 \pm 0,728 \frac{mg\ GAE}{g}$, este comportamiento indica que existe un tiempo de extracción óptimo, de esta forma, con el transcurso del tiempo, se produce la oxidación de los polifenoles ya extraídos (Choudhury et al., 2021).

Por otro lado, en relación al tiempo de extracción, se evidencia a una tendencia no lineal, debido al rendimiento de compuestos fenólicos que se incrementa desde los 30 hasta 45 minutos, al extender el proceso hasta los 60 minutos disminuye considerablemente. Según Jin et al (2018), menciona que este patrón ayuda inferir la presencia de un tiempo óptimo de extracción, en la cual desfavorece la liberación de compuestos bioactivos los mismos que afectan su estabilidad. Por consiguiente, exposiciones más prolongadas favorecen fenómenos de deterioro, como la oxidación de polifenoles, cuando existe oxígeno disuelto en el sistema, además, en algunos casos puede generarse reacciones de hidrólisis en moléculas que tengan estructuras químicamente lábiles, asimismo, puede ocurrir transformaciones más complejas, como procesos de polimerización y condensación, los cuales disminuyen la fracción cuantificable de estos metabolitos secundarios.

Los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA) de estos datos sustentan esta interpretación, evidenciando que la relación (sólido: solvente) es el factor estadísticamente más significativo ($p < 0,05$), es decir, tiene mayor influencia sobre la respuesta ($F=233,05$), confirmando su rol determinante en la eficiencia de extracción. Por otra parte, el tiempo de extracción presenta un efecto significativo ($p=0,001$), lo cual indica su contribución en la variabilidad del contenido de compuestos bioactivos, esto sugiere que el tiempo no se limita únicamente a un efecto lineal, sino que responde a fenómenos cinéticos, donde intervienen mecanismos como la transferencia de masa hacia el solvente, de esta forma, los resultados completos del análisis se presentaron en el Anexo 6.

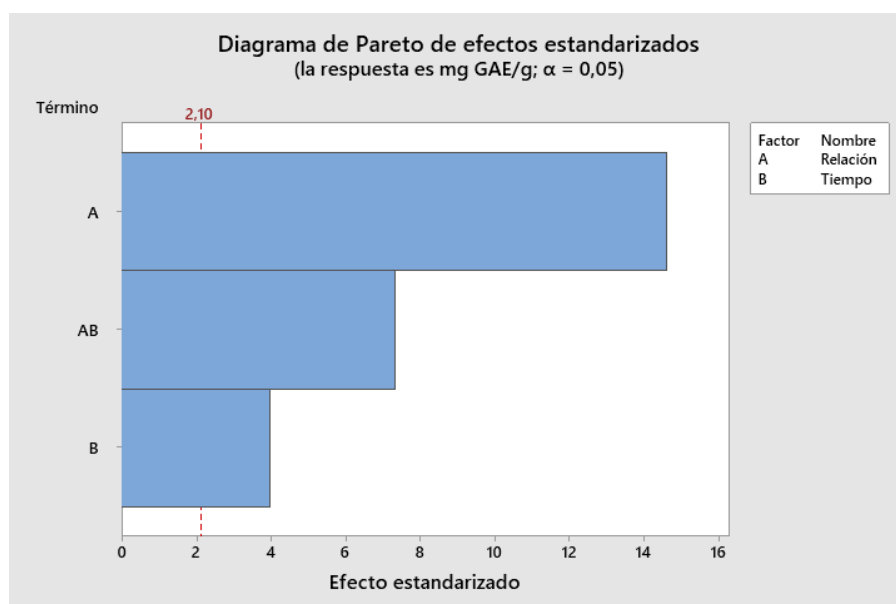
La interacción relación*tiempo ($F=22,53$; $p=0,000$), indicó que el efecto de un factor depende del nivel de otro, es decir, que el impacto del tiempo de extracción sobre el rendimiento varía según la relación sólido: solvente utilizada. Karaogul et al. (2025), mencionan que tiempos prolongados pueden ser beneficiosos en relaciones bajas, en caso contrario, pueden ser perjudiciales debido a la aparición de fenómenos de degradación, por lo tanto, el valor asociado al término lineal ($F=121,83$) evidencia la tendencia más predominante del sistema y los términos de interacción incrementan de manera significativa su capacidad predictiva, es decir, que responde a la sinergia entre las variables operativas.

Por otra parte, como se observa en el anexo 6, el reducido valor del error medio cuadrático ($MC=0,2189$) refleja una adecuada exactitud experimental, lo cual respalda la coherencia y confiabilidad de los resultados obtenidos. En este sentido, el análisis estadístico presentado confirma que la relación sólido solvente y el tiempo de extracción, así como la interacción de ambos factores, desempeñan un papel determinante en la optimización del proceso, influyendo significativamente el rendimiento final, en síntesis, el (ANOVA) complementa evidencia que la extracción de polifenoles en la oca responde a un sistema de carácter multifactorial (Karaogul et al., 2025).

Además, mediante la prueba de comparación *Tukey* se comprobó la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos evaluados ($p < 0,05$), permitiendo identificar aquellas condiciones con mayor capacidad de extracción de polifenoles. El tratamiento relación (sólido: solvente) 1:25 y 45 minutos de extracción registro el valor promedio más elevado con respecto al contenido total de polifenoles (13,206 mg GAE/g), el cual se ubicó dentro del grupo estadístico A, lo que demuestra un comportamiento superior en comparación de las demás combinaciones evaluadas

Por otro lado, el análisis de optimización de respuesta ratificó que las mejores condiciones del proceso correspondieron al tratamiento 8 (1:25 x 45 minutos) con una deseabilidad compuesta de 0.988, evidenciando una adecuada capacidad predictiva del modelo, este valor refleja un nivel de adecuación y confiabilidad del modelo aplicado, debido a que permitió maximizar eficientemente la extracción de compuestos bioactivos. Los resultados completos de la prueba de comparación de medias y la de optimización de respuesta se muestran en el Anexo 7 y 8.

Figura 3. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el contenido de polifenoles totales (mg GAE/g) en extractos de oca (*Oxalis Tuberosa* Mol.).



Nota. (A: Efecto de la Relación material vegetal–disolvente; B: Efecto del Tiempo; AB: La interacción entre la relación y el tiempo).

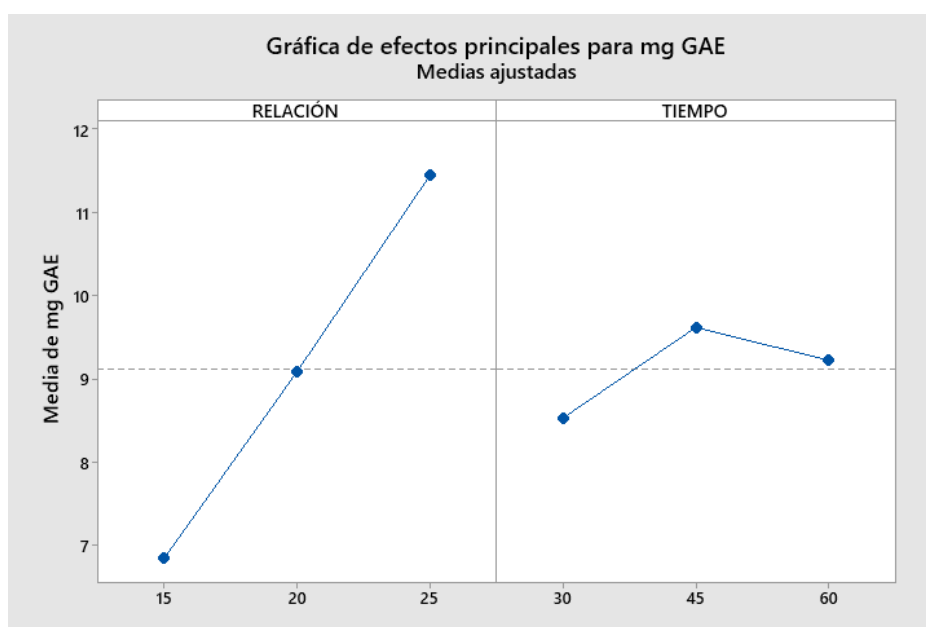
Como se observa en la figura 3 del diagrama de *Pareto* de efectos estandarizados se evidencia con claridad la contribución de los factores estudiados sobre el contenido de polifenoles total mg GAE/g. En este contexto, el factor *A* relación (sólido: solvente) presenta mayor efecto estandarizado sobrepasando el umbral de significancia ($\alpha = 0,05$), evidenciando que es la variable con mayor incidencia en el proceso de extracción, es decir, los cambios en el factor *relación* son el motor principal de la variación en el contenido de mg GAE/g. Según Rocha et al. (2019) este comportamiento sugiere que, al incrementar la cantidad de solvente en relación con la masa de la muestra, genera un mayor gradiente de concentración lo que permite la solubilización de los compuestos bioactivos.

La interacción *AB*, es el segundo efecto más importante debido a que esta interacción es significativa como el efecto del factor *relación* sobre la respuesta depende del tiempo utilizado y viceversa, donde determinadas combinaciones favorecen la recuperación de polifenoles, mientras que otras reducen. Velásquez-Barreto & Velezmoro-Sánchez (2022) señala que, desde una perspectiva fenomenológica, este comportamiento se relaciona con procesos de difusión y con respecto al equilibrio entre sólido-líquido, es decir, que dependen simultáneamente de la proporción de solvente disponible y el tiempo de contacto entre fases, no se pueden analizar los factores de forma aislada sin cometer errores de interpretación.

En contraste, el factor *B* (tiempo de extracción), es el de menor magnitud relativa, sin embargo, sigue siendo estadísticamente significativo ya que superar el umbral de significancia, pero su menor aporte sugiere que su influencia es secundaria dentro del sistema, actúa como modulador del proceso más que un factor dominante (Rocha et al., 2019). En consecuencia, el tiempo favorece la liberación de compuestos fenólicos en etapas iniciales, no obstante, incrementos prolongados puede afectar la estabilidad de los metabolitos secundarios y la pérdida de los mismos por fenómenos de degradación.

En conjunto, el análisis del diagrama de *Pareto* establece que la extracción de polifenoles en la oca (*Oxalis tuberosa* Mol.) es un sistema multifactorial controlada por fenómenos de transferencia de masa, con una dependencia de la relación, mientras que el tiempo actúa como un parámetro de naturaleza cinética que estabiliza la velocidad del proceso, lo cual depende de la cantidad de solvente disponible.

Figura 4. Gráfica de efectos principales para el contenido de polifenoles totales (mg GAE/g) en extractos de oca (*Oxalis tuberosa*).

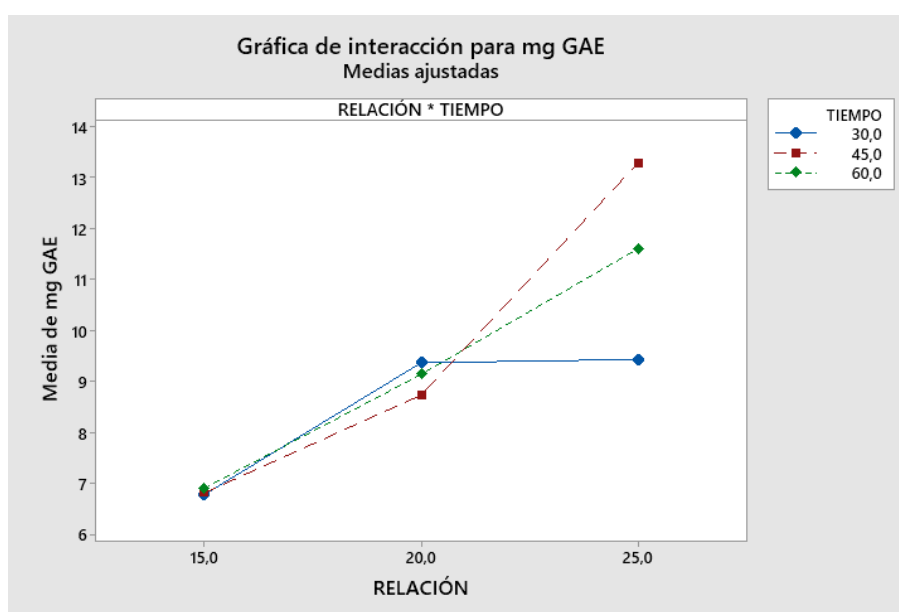


Como se observa en la figura 4, los efectos principales tienen una influencia individual de la relación y tiempo de extracción sobre el contenido de polifenoles totales mg GAE/g, considerando las medias ajustadas del modelo, se observa que al aumentar la relación 1:15 a 1:25, hay un incremento significativo y constante en la media de mg GAE, es decir, una mayor relación de solvente permite una eficaz transferencia de masa debido a que tiene más solvente

disponible por unidad de materia prima, el gradiente de concentración es mayor, lo que permite una eficiente extracción de polifenoles hacia el medio extractivo según lo reportado por (Xu et al., 2026).

Por otro lado, el factor tiempo de extracción muestra un comportamiento no lineal entre los 30 y 45 minutos, la extracción incrementa considerablemente, sin embargo, al pasar los 45 a 60 minutos se observa una ligera disminución en la media de mg GAE. De acuerdo con Velásquez-Barreto & Velezmoro-Sánchez (2022), el pico a los 45 minutos sugiere que se ha alcanzado el equilibrio de extracción, es decir, su máxima liberación de compuestos fenólicos antes que comience a predominar fenómenos de degradación debido a una exposición prolongada al método de extracción, por otro lado, la pendiente de la línea de *relación* es más inclinada que la del *tiempo*, lo cual indica que la variable estadísticamente significativa es la relación en la obtención de polifenoles que el tiempo en los rangos evaluados.

Figura 5. Gráfica de interacción entre la relación solvente-materia y el tiempo de extracción sobre la concentración de polifenoles totales.



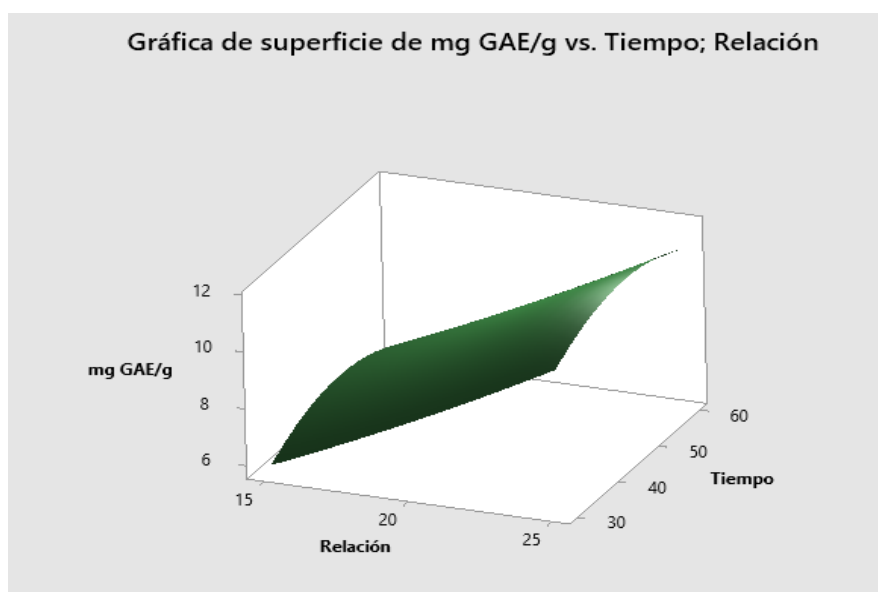
La gráfica de interacción (relación * tiempo) permite observar de manera conjunta el efecto combinado más allá de los efectos individuales que influyen en el rendimiento de polifenoles totales. Este comportamiento confirma lo evidenciado en el (ANOVA) complementario, donde

la interacción resulto estadísticamente significativa demostrando que el efecto de un factor depende del nivel del otro.

En el tiempo de 30 minutos presenta la menor respuesta a cambios en la relación, al pasar de una relación 1:20 a 1:25, la curva se vuelve más horizontal, lo que significa que a tiempos cortos, por lo tanto, al aumentar el solvente deja de ser eficiente porque alcanza un estado de saturación, restringiendo la difusión de compuestos fenólicos, por otro lado, al transcurrir los 45 minutos, se establece que es la condición más productiva, debido a que muestra la pendiente más pronunciada, alcanzando el valor máximo de extracción, es decir, la mayor eficiencia se logra con una relación de 1:25 en un tiempo de 45 minutos.

En el tiempo de 60 minutos, aunque la tendencia sigue ascendente, se mantiene por debajo de los resultados de los 45 minutos en el nivel de relación 1:25, este comportamiento favorece a la degradación oxidativa, hidrólisis o transformación estructural lo cual reduce su concentración final. En conjunto, la gráfica de interacción demuestra que la optimización del proceso no puede abordarse analizando cada factor por separado, sino que es necesario considerar su efecto en conjunto (Rocha et al., 2019).

Figura 6. Gráfica de superficie de respuesta en 3D para el contenido de polifenoles totales (mg GAE/ g) en función de la relación material vegetal-disolvente y el tiempo de extracción.



En la figura 6, la gráfica de superficie de respuesta se visualiza el efecto de la relación (sólido: solvente) y el tiempo de extracción sobre el contenido de polifenoles totales (mg GAE/g). La superficie presenta una pendiente más pronunciada en la dirección de la relación, confirmando que es el factor más significativo sobre la respuesta. A medida que la proporción (sólido: solvente) se incrementa de 1:15 a 1:25, se observa un aumento sostenido en el contenido de polifenoles en concordancia con el análisis de varianza, donde este factor demostró una alta significancia estadística. Según Xu et al. (2026), este comportamiento se atribuye a la intensificación del gradiente de concentración y la mayor cantidad de solvente disponible, lo que permite que la transferencia de masa sea eficiente desde la matriz vegetal hacia el medio de extracción.

Por otro lado, en el eje del tiempo la superficie muestra una curvatura moderada, comprobando un comportamiento no tan lineal, además, se observa que el rendimiento aumenta al pasar de 30 a 45 minutos aproximadamente, alcanzando una zona cercana al valor máximo, lo que le permite estabilizarse. En concordancia con lo reportado por Safitri et al. (2026), sugiere la existencia de un óptimo local, donde se logra un equilibrio entre la liberación de compuestos y su estabilidad, adicionalmente, la inclinación de la superficie no es uniforme a lo largo del plano, lo que evidencia la existencia de una interacción entre los factores, en concordancia con lo reportado en el anexo 6.

3.1.4. Eficiencia cuantitativa de la microencapsulación

Tabla 9. Resultados del rendimiento y de la eficiencia de microencapsulación.

Muestras	Concentración mg GAE/g	Rendimiento del proceso	Eficiencia
Contenido total disuelto en agua	13,156	85,43%	63,42%
Contenido superficial disuelto en etanol	4,812		

Los valores obtenidos en el rendimiento de microencapsulación evidencian que el proceso de secado por aspersión presento una elevada recuperación del material del 85,43%, demostrando que la pérdida de producto durante la atomización fue reducida. Además, este valor refleja que las condiciones de operación empleadas durante el secado beneficiaron a la formación de microesferas con adecuada estabilidad y facilidad de recuperación (Moscoso-Moscoso et al., 2026).

Según Xu et al. (2026), menciona que este comportamiento se relaciona con la concentración de sólidos presentes en la alimentación y con las propiedades del encapsulante (maltodextrina), debido a que contribuye a la formación de partículas estables y menos propensas a adherirse a las paredes del equipo durante la atomización, por otra parte, González-Victoriano et al. (2025), señalan que rendimientos superiores al 80% en procesos de microencapsulación mediante secado por aspersión son considerados satisfactorios, ya que refleja una adecuada eficiencia del proceso y menor pérdida del material durante el proceso.

En relación al contenido fenólico total disuelto en agua, se presentó un valor de 13,156 mg GAE/g, mientras que el contenido superficial disuelto en etanol fue de 4,812 mg GAE/g. La diferencia entre ambos resultados sugiere que una proporción considerable de los compuestos fenólicos quedó encapsulada dentro de la matriz formada por el agente encapsulante, mientras que otra parte permaneció en la superficie de las microesferas.

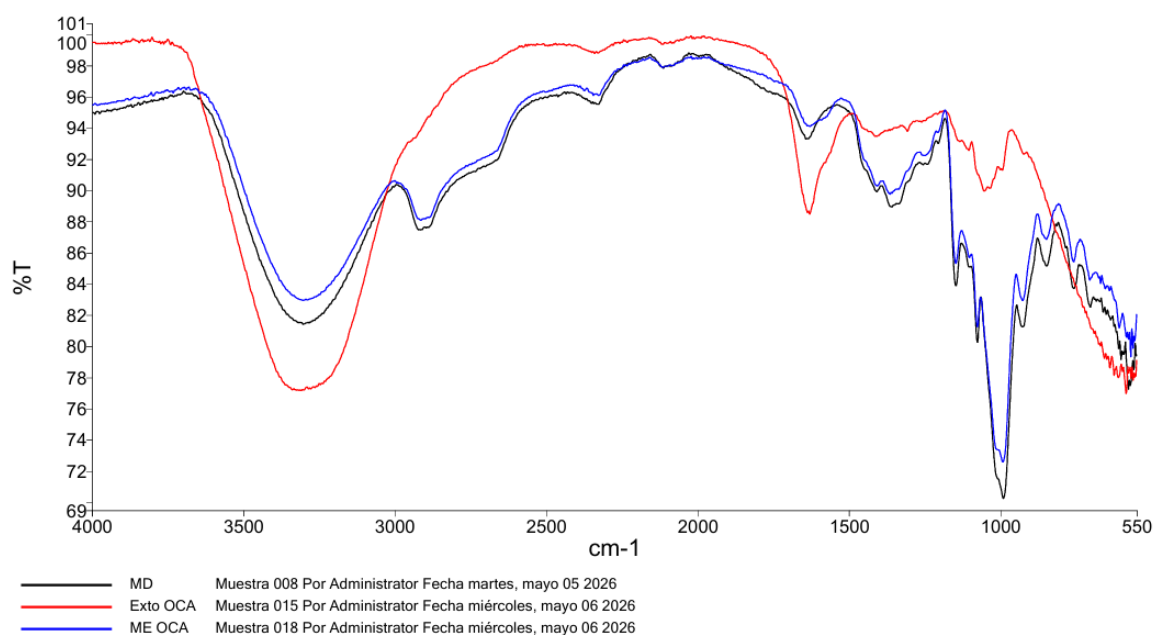
En este contexto, la eficiencia de la microencapsulación fue de 63,42%, lo que evidencia que una proporción considerable de polifenoles fue incorporada dentro de la estructura interna de las microesferas formadas durante el proceso de atomización, este resultado se considera favorable dentro de este tipo de sistemas, debido a la elevada susceptibilidad de los compuestos fenólicos frente a las condiciones térmicas y oxidativas durante el secado por aspersión (Velásquez-Barreto & Velezmoro-Sánchez, 2022).

Desde este enfoque, la eficiencia alcanzada adquiere gran importancia, debido a la compleja composición fisicoquímica de los extractos obtenidos de tubérculos andinos, estas matrices vegetales se caracterizan por tener una alta cantidad de azúcares reductores, sustancias hidrofílicas y diversos metabolitos secundarios con afinidad acuosa, los cuales tienden a interferir en la formación de una estructura encapsulante estable y uniforme durante el proceso de atomización.

Este valor puede considerarse aceptable dentro de los procesos de microencapsulación, aunque fue inferior al reportado en investigaciones realizadas con otros tubérculos andinos, en este contexto, Velásquez-Barreto & Velezmoro-Sánchez (2022) reportaron una eficiencia del 78% en extractos de mashua, diferencia que se relaciona con las características fisicoquímicas del extracto, tipo de material encapsulante implementado y las condiciones de atomización.

3.1.5. Espectro infrarrojo comparativo del extracto microencapsulado, extracto no microencapsulado y mezcla de polímero.

Figura 7. Espectro FTIR comparativo.



Nota. La línea negra corresponde a MD (maltodextrina), la línea roja a Extó OCA (extracto no microencapsulado) y la línea azul a ME OCA (extracto microencapsulado).

En la figura 7 se observa que en la zona de 3200-3400 cm^{-1} se observa una banda extensa asociada al estiramiento del grupo O-H, característicos de grupos hidroxilo perteneciente en polisacáridos como la maltodextrina y compuestos fenólicos del extracto. La muestra no microencapsulada contiene mayor intensidad en esta región debido a la alta presencia de grupos fenólicos expuestos. Por otro lado, el espectro del extracto microencapsulado tiene un comportamiento similar al de la maltodextrina, lo que indica que una fracción de estos grupos funcionales permaneció protegida con el material encapsulante durante el proceso de atomización (Gong et al., 2024).

En el extracto no microencapsulado se evidenció una banda alrededor de 3311 cm^{-1} , correspondiente a las vibraciones de compuestos fenólicos, moléculas de agua y azúcares, debido a que los grupos hidroxilos están relacionados con la capacidad antioxidante de los compuestos fenólicos. Por otro lado, el espectro del polímero encapsulante evidenció interacciones intermoleculares entre los grupos hidroxilos del extracto y la del agente

encapsulante en la región cercana de 3305 cm^{-1} , asociada principalmente a la formación de puentes de hidrógeno, por lo tanto, este comportamiento favoreció la preservación de la actividad antioxidante de los metabolitos fenólicos frente a los posibles procesos de degradación durante el secado por aspersión (Xiao et al., 2022).

En la región entre 2920 y 2950 cm^{-1} se distinguen bandas asociadas a las vibraciones C-H de cadenas alifáticas, esta señal son características de carbohidratos y matrices vegetales, evidenciado la participación tanto del extracto como del polímero, además, la similitud entre la maltodextrina, extracto no microencapsulado y el extracto microencapsulado demuestra que el polímero (maltodextrina) representa la matriz principal que conforma la estructura del microencapsulado en polvo.

En el intervalo 1600 - 1650 cm^{-1} se observa que el extracto no microencapsulado contiene una banda más intensa y definida, la cual está asociada a estructuras aromáticas y vibraciones que corresponden a características de compuestos fenólicos y flavonoides presentes en el tubérculo andino, por otro lado, en el extracto microencapsulado tiene una señal menos intensa y con pocas vibraciones, lo cual sugiere que una fracción de estos compuestos bioactivos fue retenida en el interior del polímero de recubrimiento (Xiao et al., 2022).

En la región cercana a 1630 cm^{-1} , el extracto no microencapsulado presento una banda vinculada con vibraciones de grupos carbonilo ($\text{C}=\text{O}$) y enlaces aromáticos ($\text{C}=\text{C}$), característicos de flavonoides y compuestos fenólicos presente en matrices vegetales, in embargo, en el espectro del microencapsulado, esta señal se observó menos predominante debido a la superposición de las bandas propias de la maltodextrina sobre las del extracto. Este comportamiento sugiere que los compuestos fenólicos del extracto no quedaron expuestos en la superficie del polvo, sino que quedaron retenidos y protegidos por el polímero encapsulante (Różyło et al., 2022).

La región entre 1000 y 1150 cm^{-1} corresponde a una de las zonas más características del espectro, en la cual se observa bandas con mayor intensidad asociadas a vibraciones de enlaces glucosídicos C-O-C y grupos C-O, comunes de estructuras polisacáridas (Xiao et al., 2022). La cual contiene una marcada intensidad entre el polímero y el microencapsulado. De acuerdo con Velásquez-Barreto & Velezmoro-Sánchez (2022), este comportamiento demuestra que el

polímero de recubrimiento ejerce una influencia significativa sobre el espectro final, la cual podría bajar la intensidad de bandas relacionadas a los compuestos fenólicos encapsulados.

El espectro del extracto microencapsulado correspondiente a la línea azul presenta mayor similitud con el perfil espectral del polímero de recubrimiento que con el extracto no microencapsulado. Según Różyło et al. (2022), este comportamiento suele observarse en procesos por atomización, en la cual las señales características del extracto tienden a disminuir su intensidad por el material encapsulante. En síntesis, el espectro FTIR evidencia que el microencapsulado presenta un perfil predominante por la maltodextrina, debido a que durante el secado por aspersión los compuestos bioactivos quedaron retenidos dentro del polímero de recubrimiento, favoreciendo la estabilidad y conservación de compuestos bioactivos, respaldando su potencial uso como ingrediente funcional.

3.1.6. Capacidad antioxidante del extracto microencapsulado por el método DPPH (2,2 difenil- 1- picrilhidracilo).

Tabla 10. Capacidad antioxidante del microencapsulado (*Oxalis Tuberosa* Mol.).

Muestra	Capacidad antioxidante ($\mu\text{mol Eq. Trolox/g muestra}$)
Microencapsulado de oca (<i>Oxalis Tuberosa</i> Mol.)	$10,90 \pm 0,42$

Nota. Los resultados se expresan como promedio $\pm$ desviación estándar (n = 3).

La capacidad antioxidante del microencapsulado del tubérculo (*Oxalis Tuberosa* Mol.) alcanzó un valor de $10,90 \pm 0,42 \mu\text{mol Eq. Trolox/g muestra}$, este resultado demuestra la presencia de metabolitos con potencial bioactivo. De acuerdo con Reyna et al., (2015), este comportamiento sugiere que el proceso de microencapsulación mediante atomización contribuyó a la conservación de compuestos fenólicos responsables de neutralizar los radicales libres.

Según Santos (2017), a pesar de la exposición a temperaturas elevadas durante el proceso de atomización, se mantuvo una estabilidad significativa de compuestos antioxidantes, la elevada capacidad para disminuir el radical DPPH se relaciona a la acción de los grupos funcionales

hidroxilo presente en los compuestos fenólicos, además, el autor demuestra que la formación de microesferas fue más rápida que la cinética de degradación térmica de los antioxidantes, permitiendo una mayor retención de los metabolitos secundarios.

Los valores obtenidos en la presente investigación se localizaron dentro de los rangos reportados por (Moscoso-Moscoso et al., 2026), quienes registraron capacidades antioxidantes entre 10,33 y 84,49 $\mu\text{mol Eq. Trolox/g}$ utilizando hidrocoloide de linaza, las formulaciones con menor concentración de hidrocoloide de linaza (2.5%) presentaron las mayores capacidades antioxidantes, mientras que las formulaciones con 10% de encapsulante mostraron los valores más bajos. La variación observada se atribuye a las diferencias en la complejidad del ecotipo vegetal, tipo de solvente implementado durante la extracción, polímero encapsulante y las condiciones de procesamiento, factores que influyen significativamente en la disponibilidad de los compuestos antioxidantes (Xiao et al., 2022).

Por otra parte, la capacidad antioxidante obtenida esta relaciona con la composición fitoquímica de la oca, debido a que contiene metabolitos secundarios con propiedades bioactivas, asimismo, los solventes hidroalcohólicos como el etanol presentan mayor eficiencia para extraer este tipo de compuestos por su polaridad intermedia. Desde el punto funcional, este comportamiento es relevante debido a que un ingrediente funcional debe preservar sus propiedades bioactivas durante el procesamiento y almacenamiento (Rocha et al., 2019).

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- El extracto de oca (*Oxalis tuberosa* Mol.) microencapsulado mediante secado por aspersión evidencio un importante potencial como ingrediente funcional, debido a la retención de compuestos fenólicos y por la actividad antioxidante conservada después del proceso de atomización, además, la utilización de maltodextrina como polímero encapsulante favoreció la formulación de microesferas estables contribuyendo la protección de los metabolitos secundarios, permitiendo conservar sus propiedades funcionales para su incorporación en matrices alimentarias.

- Se logró extraer satisfactoriamente polifenoles de la oca (*Oxalis tuberosa* Mol.) por medio del método de Folin-Ciocalteu, donde se alcanzó el mayor rendimiento polifenólico bajo las condiciones de relación sólido:solvente 1:25, un tiempo de extracción de 45 minutos y el uso de etanol al 50%, de esta forma, se logró identificar al factor relación con la mayor influencia significativa sobre la recuperación de compuestos fenólicos.
- Se consiguió exitosamente el microencapsulado del extracto de oca mediante secado por aspersión utilizando maltodextrina como agente encapsulante, obteniéndose un polvo estable con adecuada eficiencia de encapsulación. El análisis FTIR evidenció interacciones entre la matriz encapsulante y los compuestos fenólicos del extracto, confirmando su retención y protección dentro de las microesferas.
- El extracto microencapsulado presentó una capacidad antioxidante 10,90 μmol Eq. Trolox/g de muestra, evidenciando la presencia de compuestos para neutralizar radicales libres, demostrando que la microencapsulación con maltodextrina permite la protección de los metabolitos secundarios, lo que evidencia la eficiencia del proceso de microencapsulación en la conservación de la funcionalidad antioxidante del extracto.

4.2. Recomendaciones

- Incorporar el microencapsulado de oca en diferentes matrices alimentarias, como bebidas funcionales, productos lácteos, snacks o panificados para evaluar su comportamiento tecnológico, estabilidad y aceptabilidad sensorial.
- Complementar la evaluación antioxidante con otros métodos analíticos, como ABTS o FRAP con el fin de obtener una caracterización más integral de los mecanismos de acción antioxidante y del comportamiento de los compuestos bioactivos.
- Evaluar otros polímeros encapsulantes o mezclas de estos agentes, como goma arábica, inulina o almidones modificados, con el objetivo de mejorar la eficiencia de microencapsulación y la estabilidad de los compuestos fenólicos durante el secado por aspersión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Avello, M., & Suwalsky, M. (2006). Radicales libres, antioxidantes naturales y mecanismos de protección. *Atenea* (Concepción) 494, 161–172. <https://doi.org/10.4067/s0718-04622006000200010>
- AOAC. (2015). Instructivo técnico para recuento de Coliformes y E. Coli mediante Técnica Petrifilm AOAC Método Oficial 991.14. Recuperado de <https://www.sag.gob.cl/sites/default/files/it-lab-16-v02.pdf>
- AOAC. (2017). Guía de interpretación de Recuento de Mohos y Levaduras. Recuperado de <https://multimedia.3m.com/mws/media/1624089O/3m-petriefilm-placas-hongos-y-levaduras-ym-guia-de-interpretacion.pdf>
- Bedoya-Cataño, J. F., Ramón-Palacio, C., Gil-Garzón, M. A., & Ramírez-Sánchez, C. (2022). Extracción de antioxidantes de los arándanos (*Vaccinium corymbosum*): efecto de solventes verdes sobre polifenoles totales, capacidad antioxidante y comportamiento electroquímico. *Tecnológicas*, 25(53).
- Caizaguano Quinfía, J. D. (2025). Recuperación de polifenoles a partir de los desechos de arándano (*Vaccinium corymbosum*) [Trabajo de titulación, Universidad Técnica de Ambato].
- Cayambe, E., & Castañeda, A. (2019). Recuperación de nanopartículas de alofán del refrigerante secundario propilenglicol mediante varios métodos de separación de mezclas [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/b1de7513-59a7-4e0a-bec6-483937539f8b/content>
- Castañeda, M., & Perea, D. (2020). *Estabilidad de compuestos bioactivos en extractos vegetales aplicados a alimentos funcionales*. *Revista Latinoamericana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 12(3), 45–56.
- Cabra, J. R. V. (2017). Identificación de polímeros por espectroscopía infrarroja. *Revista Ontare*, (5), 3.
- Caizaguano Quinfía, J. D. (2025). Recuperación de polifenoles a partir de los desechos de arándano (*Vaccinium corymbosum*) [Tesis de grado, Universidad Técnica de Ambato]. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/45057>
- Córdova, P. A. A., & Carpio, A. R. C. (2024). Conservación ex situ del cultivo de la Oca *Oxalis* tuberosa Mol. en la parroquia Cariamanga–Loja. *Maestro y Sociedad*, 99-104.

- Esquivel-González, B. E., Martínez, L. O., & Rutiaga-Quñones, O. M. (2015). Microencapsulación mediante secado por aspersión de compuestos bioactivos. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 16(2), 180-192.
- Espinosa Andrews, H., & García Márquez, E. (Eds.). (2017). *Tecnologías de nano/microencapsulación de compuestos bioactivos* (1.^a ed.). Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco.
- Flores, R., Aguirre, L., & Salazar, P. (2022). *Microencapsulación por secado por aspersión como estrategia para la protección de compuestos bioactivos en matrices alimentarias*. *Journal of Food Innovations*, 8(1), 77–90.
- Fernández-Rodríguez, V. E., & Ruiz-López, M. A. (2021). Contenido de polifenoles, capacidad antioxidante y toxicidad de *Solanum ferrugineum* (solanaceae) con potencial medicinal. *Acta Biológica Colombiana*, 26(3), 414-422.
- Gazalian, D., Aliahmadi, A., & Rafati, H. (2025). Microencapsulation of *Lactobacillus plantarum* using cellulose-based polymers by spray-drying: A probiotic-delivery system for enhanced acid-resistance and storage stability. *International Journal of Biological Macromolecules*, 311, 143634. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2025.143634>
- Gamboa, R., Luján, D., & Vásquez, E. (2021). *Caracterización fisicoquímica y funcional de tubérculos andinos: oca, mashua y olluco*. *Ciencia Andina*, 19(2), 112–129.
- García, E. L., Pineda, A. G., Hernández, E. S., Torres, M. N. M., & Martínez-Mata, A. J. (2025). Implementación de una herramienta para un análisis en la estadística inferencial en pruebas de hipótesis con varianza conocida. *Revista Ipsumtec*, 8(3), 131–138. <https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v8i2.392>
- Gong, Y., Chen, X., & Wu, W. (2024). Application of fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy in sample preparation: Material characterization and mechanism investigation. *Advances in Sample Preparation*, 11, 100122. <https://doi.org/10.1016/J.SAMPRE.2024.100122>
- González-Victoriano, L., Santamaría-Gómez, J. M., Hernández-Varela, J. D., Soto Simental, S., Arredondo Tamayo, B., Chanona-Pérez, J. J., & Güemes Vera, N. (2025). Developing Snack Products Based on Oca (*Oxalis tuberosa*) and Sorghum (*Sorghum* spp.) Flour: Correlation Between Antioxidant and Physicochemical Properties. *Plant Foods for Human Nutrition* 2025 80:3, 80(3), 122-. <https://doi.org/10.1007/S11130-025-01363-2>

- Jin, Y., Li, J. Z., & Nik, A. M. (2018). Starch-Based Microencapsulation. *Starch in Food: Structure, Function and Applications*, 661–690. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100868-3.00017-2>
- Karaogul, E., Cicek, S. AL, Dogan, H. H., & Alma, M. H. (2025). Microencapsulation of *Tuber aestivum* aroma: Model equations, antioxidant properties, correlation between fourier transform infrared and gas chromatography-mass spectrometry data, and morphological approach. *Food and Bioproducts Processing*, 154, 717–730. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2025.11.008>
- Li, A. N., Li, S., Zhang, Y. J., Xu, X. R., Chen, Y. M., & Li, H. B. (2014). Resources and biological activities of natural polyphenols. *Nutrients* 6(12), 6020-6047. doi:10.3390/nu6126020
- Li, Z., Kanwal, R., Yue, X., Li, M., & Xie, A. (2024). Polyphenols and intestinal microorganisms: A review of their interactions and effects on human health. *Food Bioscience*, 62, 105220. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105220>
- León Marroú, M. E., Villacorta González, M. Y., & Pagador Flores, S. E. (2011). Composición química de “oca” (*Oxalis tuberosa*), „arracacha“ (*Arracaccia xanthorrhiza*) y „tarwi“ (*Lupinus mutabilis*). Formulación de una mezcla base para productos alimenticios. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos.*, 2(2), 239–252. <https://oaji.net/articles/2017/4924-1495372520.pdf>
- Mendoza, A., Quispe, M., & Rojas, C. (2020). *Antioxidant properties and phytochemical profile of Oxalis tuberosa Mol. varieties cultivated in the Andean region*. *Andean Journal of Functional Foods*, 5(4), 211–220.
- Martinez Roca, Y. (2024). *Capacidad antioxidante in vitro de tres ecotipos del tubérculo de Oxalis tuberosa Mol. Molina. “oca”*. Ayacucho-2023.
- Mazón, N. V. C., Hermida, C. E. C., Yacelga, J. C. S., Machado, E. R. R., Murillo, P. L. G., & Mena, M. E. C. (2018). Uso de pruebas afectivas, discriminatorias y descriptivas de evaluación sensorial en el campo gastronómico. *Dominio de las Ciencias*, 4(3), 253-263.
- Moreno, B. L., & Deaquiz Oyola, Y. A. (2016). Caracterización de parámetros fisicoquímicos en frutos de mora (*Rubus alpinus* Macfad). *Acta Agronómica*, 65(2), 130-136.
- Moscoso-Moscoso, E., Buleje-Campos, D., Perez-Salcedo, R., Muñoz-Huachuilla, D., & Banda-Arias, C. V. (2026). Flaxseed Hydrocolloid as a Natural Encapsulating Material for Spray-Dried Phenolic Compounds from Andean Tubers (*Oxalis tuberosa* and *Tropaeolum tuberosum*). *Processes*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/PR14071136>

- Mayoral, J. B., Hernández, M. V., & Silveti-Loeza, A. (2019). Análisis de la actividad antioxidante en la flor de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) mediante las técnicas FRAP y DPPH. RD-ICUAP.
- NTE INEN-ISO 750 (2013). Productos vegetales y de frutas. Determinación de acidez titulable. Método Potenciométrico de Referencia. Instituto Ecuatoriano De Normalización, 1–9. Recuperado de: <https://n9.cl/jxq3w>
- NTE INEN-ISO 1842 (2013). Productos vegetales y de frutas. Determinación de pH Método pH-metro de Referencia. Instituto Ecuatoriano De Normalización, 1–9. Recuperado de: <https://n9.cl/kitbfm>
- NTE INEN-ISO 2173 (2013). Productos vegetales y de frutas. Determinación De Sólidos Solubles. Método Refractométrico. Instituto Ecuatoriano De Normalización, 1–9. Recuperado de: <https://n9.cl/c4f2c>
- Rana, A., Samtiya, M., Dhewa, T., Mishra, V., & Aluko, R. E. (2022). Health benefits of polyphenols: A concise review. *Journal of Food Biochemistry*, 46(10). <https://doi.org/10.1111/jfbc.14264>
- Reyna, E. N., Álvarez, G. M., Iliná, A., & Hernández, J. L. M. (2015). Microencapsulación de componentes bioactivos. *Investigación y ciencia*, 23(66), 64-70.
- Rocha, J. de C. G., de Barros, F. A. R., Perrone, Í. T., Viana, K. W. C., Tavares, G. M., Stephani, R., & Stringheta, P. C. (2019). Microencapsulation by atomization of the mixture of phenolic extracts. *Powder Technology*, 343, 317–325. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2018.11.040>
- Różyło, R., Szymańska-Chargot, M., Zdunek, A., Gawlik-Dziki, U., & Dziki, D. (2022). Microencapsulated Red Powders from Cornflower Extract—Spectral (FT-IR and FT-Raman) and Antioxidant Characteristics. *Molecules*, 27(10), 3094. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES27103094/S1>
- Peñaloza Suárez, A. G. (2022). Obtención y microencapsulación de un extracto rico en compuestos fenólicos con capacidad antioxidante de guayusa (*Ilex guayusa*) [Trabajo de titulación, Universidad Técnica de Ambato].
- Pino, M. T., & Vergara, C. (2022). Colorantes y antioxidantes naturales en la industria de alimentos: tecnologías de extracción y materias primas dedicadas.
- Pico, C., Vega, J., Tubón, I., Arancibia, M. y Casado, S. 2022. Nanoscopic Characterization of Starch Biofilms Extracted from the Andean Tubers *Ullucus tuberosus*, *Tropaeolum tuberosum*, *Oxalis tuberosa* Mol., and *Solanum tuberosum*. *Polymers - MDPI*. 14 (19)

- 1- 12. Consultado el 31 agosto de 2023. Disponible en <https://doi.org/10.3390/polym14194116>
- Sandoval Velasco, R. I. (2026). Evaluación de la actividad antioxidante de los compuestos extraídos de los residuos agroindustriales de guayaba (*Psidium guajava L.*) como fuente natural de compuestos bioactivos provenientes de una industria de helados del cantón Salcedo, provincia de Cotopaxi [Trabajo de titulación, Universidad Técnica de Ambato].
- Safitri, A., Azzahra Probadica, A. A., Aflacya Khanza, Y. S., Ulfa, S. M., Wardhani, S., & Kurnianingsih, N. (2026). Response surface methodology-based optimization of alginate and chitosan microencapsulation of Delonix regia extract for antioxidant activity. *South African Journal of Chemical Engineering*, 100891. <https://doi.org/10.1016/J.SAJCE.2026.100891>
- Sánchez, F.; Mejia, N. y Flores, M. 2022. Potencialidad del uso de oca (*Oxalis tuberosa Mol.*) como ingrediente principal para mermelada. *RECIENA*. 2(2) 59-64. Disponible en <https://reciena.esPOCH.edu.ec/index.php/reciena/article/view/40>
- Sotomayor, M. F., & Vargas, D. A. (2017). Optimización de extracción, microencapsulación y evaluación de la capacidad antioxidante de antocianinas de flor de Jamaica (*Hibiscus sabdariffa*) mediante secado por aspersión (Doctoral dissertation, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2017).
- Santos, D., Colette, A., Secades, V., Domingos, J., Fernandes, M., & Gomes, P. (2017). *Secado por aspersión: descripción general*. En *Biomateriales: Física y química (nueva edición)*. IntechOpen.
- Tangarife, D. P. C., Arias, L. P. P., & Zapata, A. M. O. (2021). Aspectos tecnológicos de la microencapsulación de compuestos bioactivos en alimentos mediante secado por aspersión. *Ciencia y tecnología agropecuaria*, 22(1), 1-21.
- Vera, N. G., Espino Manzano, S. O., & Hernandez, H. M. H. (2018). Use of *Oxalis tuberosa* in Gluten-free Baked Goods Manufacture. *Alternative and Replacement Foods*, 17, 167–175. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811446-9.00006-X>
- Velásquez-Barreto, F. F., & Velezmoro-Sánchez, C. E. (2022). Microencapsulation of Purple Mashua Extracts Using Andean Tuber Starches Modified by Octenyl Succinic Anhydride. *International Journal of Food Science*, 2022, 8133970. <https://doi.org/10.1155/2022/8133970>
- Voss, G. B., Oliveira, A. L. S., Alexandre, E. M. da C., & Pintado, M. E. (2022). Importance of polyphenols: Consumption and human health. *Technologies to Recover Polyphenols*

- from AgroFood By-Products and Wastes, 1–23. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85273-9.00008-9>
- Xiao, Z., Xia, J., Zhao, Q., Niu, Y., & Zhao, D. (2022). Maltodextrin as wall material for microcapsules: A review. *Carbohydrate Polymers*, 298, 120113. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2022.120113>
- Xu, J., He, S., Yu, H., Zhou, Y., Zeng, X., Du, Q., Wu, Z., & Pan, D. (2026). Polyphenol-based microencapsulation: Revolutionizing probiotic delivery and gut health. *Trends in Food Science & Technology*, 168, 105485. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2025.105485>
- Zhu, F. y Cui, R. 2020. Comparison of physicochemical properties of oca (*Oxalis tuberosa* Mol.), potato, and maize starches. *International Journal of Biological Macromolecules*. Nueva Zelanda, 601-607. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014181301939110X>
- Zapata, A. E. T. (2020). Alimentos funcionales, bases conceptuales y su aplicación en el diseño de planes de alimentación. *Biociencias*, 15(1).

ANEXOS

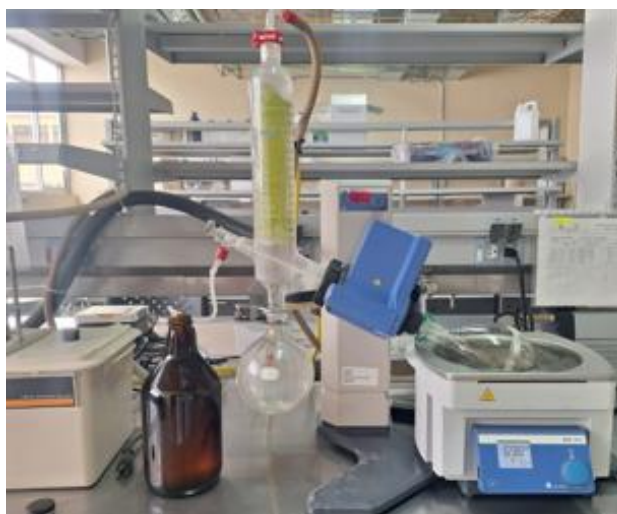
Anexo 1. Recolección y limpieza del tubérculo.



Anexo 2. Análisis fisicoquímicos del tubérculo.



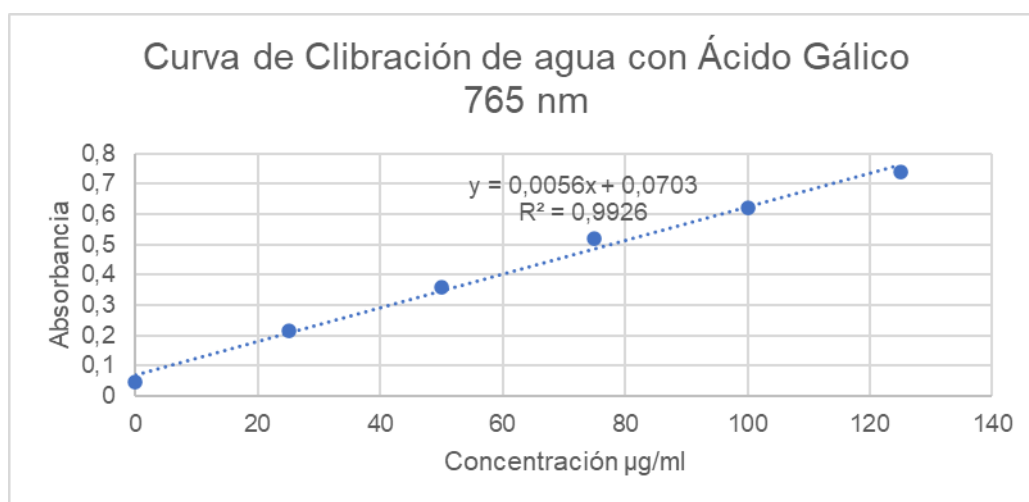
Anexo 3. Concentración del mejor tratamiento.



Anexo 4. Microencapsulación del extracto de oca.



Anexo 5. Curva de calibración de ácido gálico.



Anexo 6. Análisis de varianza.

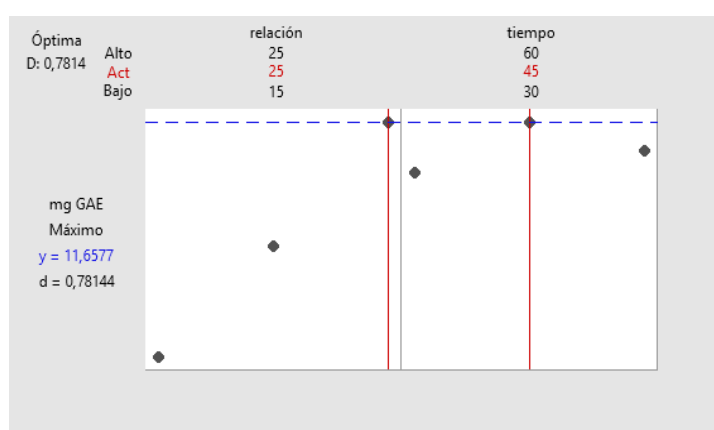
Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	126,408	15,8010	72,18	0,000
Lineal	4	106,681	26,6702	121,83	0,000
Relación	2	102,034	51,0171	233,05	0,000
Tiempo	2	4,647	2,3234	10,61	0,001
Interacciones de 2 términos	4	19,727	4,9317	22,53	0,000
Relación*Tiempo	4	19,727	4,9317	22,53	0,000
Error	18	3,940	0,2189		
Total	26	130,348			

Anexo 7. Comparaciones por pareja Tukey (Relación*Tiempo).

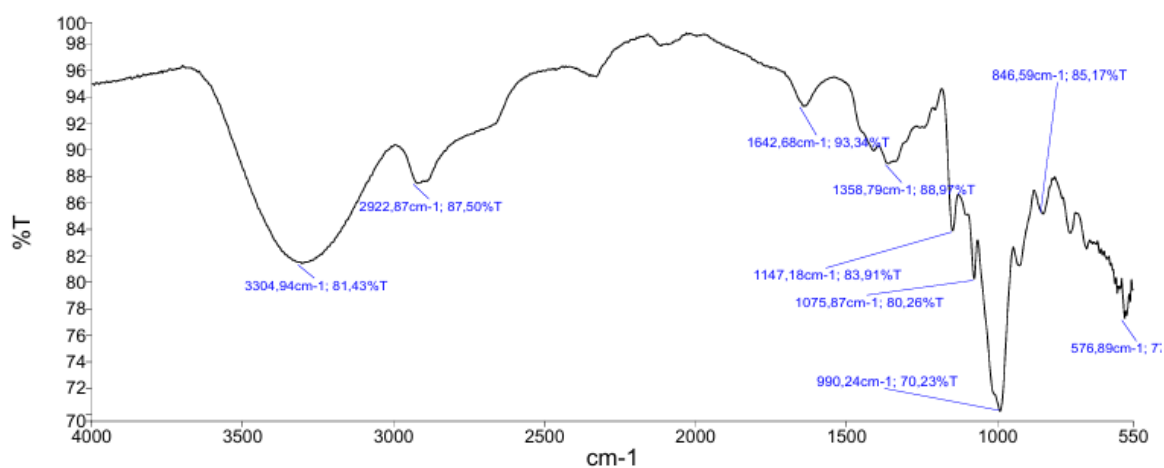
Relación*Tiempo	N	Media	Agrupación
25 45	3	13,2064	A
25 60	3	10,8722	B
25 30	3	9,3013	C
20 30	3	8,9734	C
20 60	3	8,7483	C
20 45	3	8,1101	C
15 30	3	6,3855	D
15 45	3	6,3814	D
15 60	3	6,3355	D

Anexo 8. Optimización de respuesta (mg GAE/g).

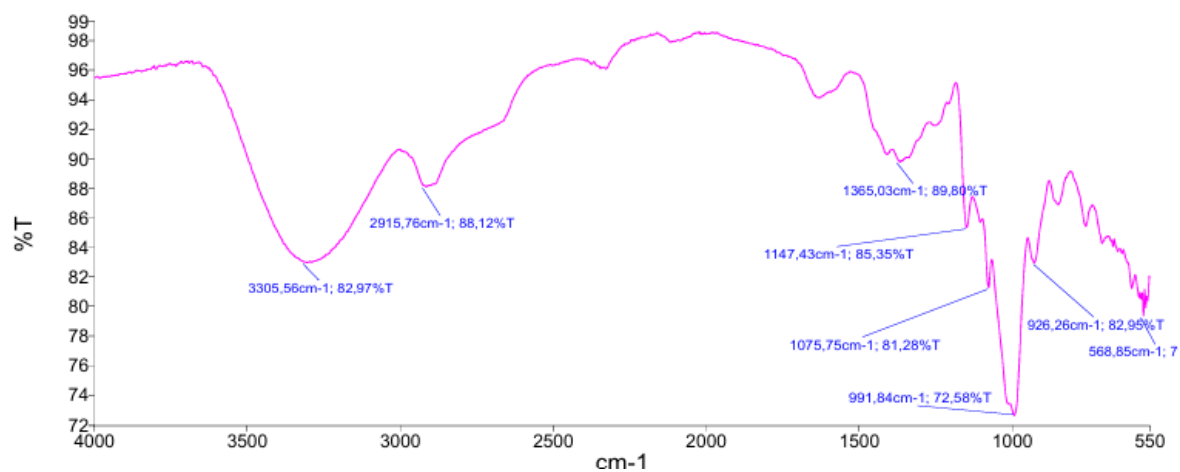


Solución	Relación	Tiempo	mg GAE/g Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	25	45	13,2064	0,988783

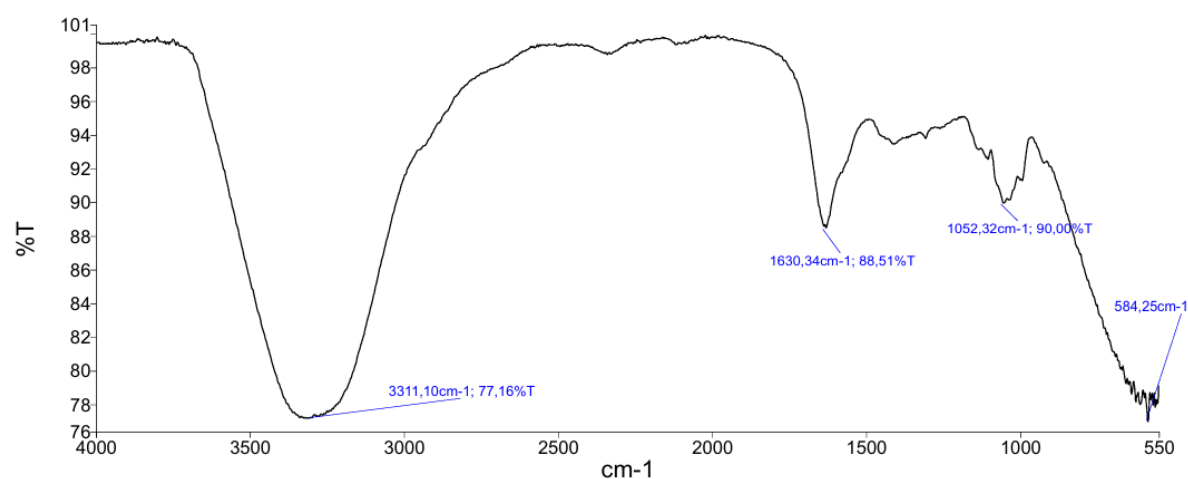
Anexo 9. Espectro del encapsulante (maltodextrina).



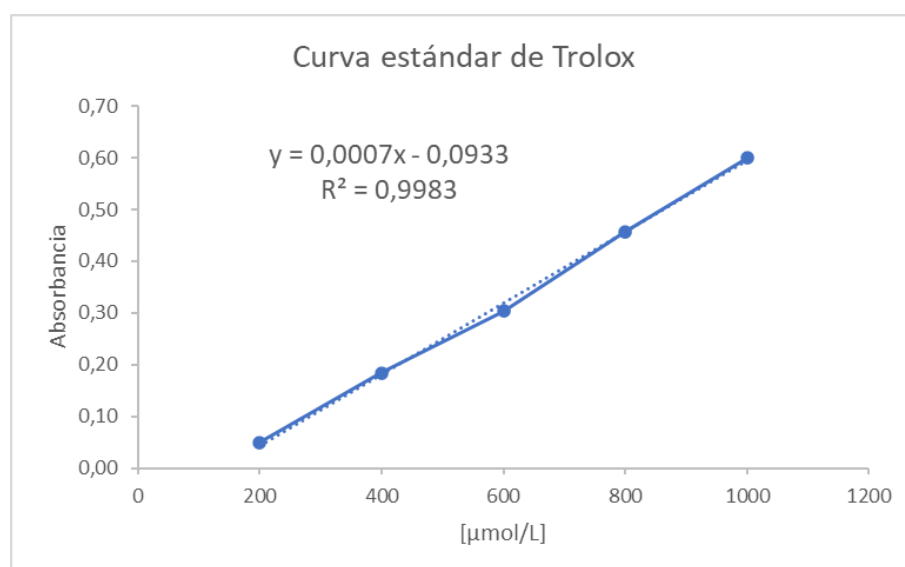
Anexo 10. Espectro del microencapsulado de oca.



Anexo 11. Espectro del extracto no microencapsulado.



Anexo 12. Curva de calibración de ácido gálico.



Anexo 13. Informe de actividad antioxidante.

 DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN	LABORATORIOS DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN Lagascoto II, Km 1 1/2, vía a San Simón, Cantón Guaranda, Provincia Bolívar, Ecuador.		Código	IR-AA
	INFORME DE RESULTADOS		Versión	1
			Año	2026
			Página	Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYOS N° 583

DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA					
Solicitante	Johanna Criollo				
Muestras	Microencapsulado de oca				
Código asignado UEB	INV 907				
Estado de la muestra	Sólido				
Envase de recepción	Funda plástica de cierre hermético con 27g aprox. de contenido de muestra.				
Análisis requerido(s)	Actividad Antioxidante				
Fecha de recepción	14 de mayo de 2026				
Fecha de análisis	14 al 15 de mayo de 2026				
Fecha de informe	15 de mayo de 2026				
Técnico (s) asignado	MFQM				
RESULTADOS OBTENIDOS					
Código de laboratorio	Muestra	Análisis	Método de análisis	Unidad	Resultado
INV 907	Microencapsulado de oca	Actividad antioxidante	DPPH ((2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo)	µmol ET/ g muestra	10,90 ± 0,42

Los resultados de los análisis corresponden a 3 determinaciones por muestra.



Validado digitalmente en FirmadEC.
Firmado digitalmente por:
MARIA FERNANDA QUINTEROS MENESSES

Ing. María Fernanda Quinteros
TÉCNICA DE LABORATORIO DIVIUEB
ELABORADO



Validado digitalmente en FirmadEC.
Firmado digitalmente por:
ISIDRO FAVIAN BAYAS MOREJON

Ing. Favian Bayas PhD.
DIRECTOR DIVIUEB
REVISADO