



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS

Y BIOTECNOLOGÍA

CARRERA INGENIERÍA EN ALIMENTOS

Tema: Efecto de la temperatura y del poder de calentamiento en las propiedades térmicas de oca (*Oxalis tuberosa*), jícama (*Smallanthus sonchifolius*), mashua (*tropaeolum tuberosum*) y camote (*Ipomoea batatas*)

Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación, previo a la obtención del 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. Trabajo de Titulación parte del Proyecto de investigación “Desarrollo de un prototipo de mezcla farinácea libre de gluten para pastelería, utilizando cultivos andinos tradicionales”, financiado por la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Universidad Técnica de Ambato según resolución 0193-CU-P-2018, coordinado por Ing. M.Sc. Diego Manolo Salazar Garcés.

AUTORA: Verónica Anabell Rodríguez Maroto

TUTORA: Ing. M.Sc. Liliana Patricia Acurio Arcos

Ambato – Ecuador

Enero - 2020

APROBACIÓN DE LA TUTORA

Ing. M.Sc. Liliana Patricia Acurio Arcos

Certifico que el presente Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación, ha sido prolijamente revisado y por lo tanto autorizo la presentación de éste, debido a que responde a las normas establecidas en el reglamento de Títulos y Grados de la Facultad.

Ambato, 6 de diciembre del 2019



Ing. M.Sc. Liliana Patricia Acurio Arcos

C.I. 180406708-8

TUTORA

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Verónica Anabell Rodríguez Maroto, manifiesto que los resultados obtenidos en el presente Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingeniera en Alimentos son absolutamente originales, auténticos y seguros; a excepción de las citas bibliográficas.



Verónica Anabell Rodríguez Maroto

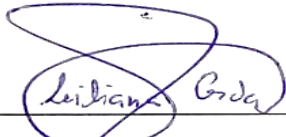
C.I. 180552207-3

AUTORA

APROBACIÓN DE LOS MIEMBROS DE TRIBUNAL DE GRADO

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

Para constancia firman:



Presidente de Tribunal de Grado



Ing. M.Sc. Fernando Cayetano Álvarez Calvache

C.I. 180104502-0



Dr. Orestes Darío López Hernández

C.I. 175478486-4

Ambato, 8 de enero del 2020

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, que haga uso de este 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 trabajo de titulación, con fines de difusión pública; además, apruebo su reproducción dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autora.



Verónica Anabell Rodríguez Maroto

C.I. 180552207-3

AUTORA

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico a Dios y la Virgen Santísima por darme salud y fortaleza necesaria para no decaer en este camino, iluminando mi mente para culminar una etapa más de mi vida.

A mis queridos padres, Luis y Zoila, quienes son el pilar fundamental en mi vida, por el amor, confianza, y apoyo incondicional que me brindaron todo este tiempo para poder formarme como una profesional. Gracias por ser mi mayor motivación.

A mis hermanos Vladimir, Liliana y Henry por su apoyo en todo aspecto, por los consejos y palabras de aliento que cada uno me dio.

A mis sobrinos Melany, Sebastián, Samantha y Matías quienes, con sus ocurrencias y cariños, calmaban mis momentos de cansancio.

A mis abuelitos Clemencia, Ercilia y Emiliano, que desde el cielo son mis ángeles que me cuidan cada día y estoy segura de que están orgullosos de mí.

Con todo mi amor,

Verónica

AGRADECIMIENTO

A mis padres, por el gran esfuerzo que hicieron para darme la mejor educación, gracias por depositar toda su confianza en mí. A mi padre, Luis por siempre tener las palabras adecuadas para no dejarme vencer y a mi madre, Zoila, por ser mi fiel compañía por escucharme y ser mi mejor amiga. Ustedes son mi mayor fortaleza para seguir adelante cumpliendo mis sueños.

A mis hermanos Vladimir, Liliana y Henry, gracias por siempre estar presentes cuando los necesito, cada uno apoyándome con sus palabras y acciones de amor para mi bienestar, ustedes son un ejemplo para mí. En especial a mi hermano Henry con quien he compartido mayor tiempo de esta etapa gracias por cuidarme y motivarme para seguir cumpliendo mis sueños.

A mi tutora, Ing. M.Sc. Liliana Patricia Acurio Arcos, por guiarme en este proceso, por compartir sus conocimientos y brindarme tiempo para el desarrollo de este trabajo de titulación, fue un placer trabajar un usted.

A mí querida Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología, por abrirme las puertas y a sus docentes quienes brindaron todos sus conocimientos y consejos para formarme como profesional.

A mi familia en general sobrino, tíos y primos por el aprecio, cariño y apoyo incondicional que me dan para no rendirme.

A mis amigas, Maribel, Vanessa, Paola, Karina y Erika, por todo el tiempo compartido en la etapa universitaria, convirtiéndola en una de la experiencia más bonita de mi vida.

Gracias de corazón a todos.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PÁGINAS PRELIMINARES

PORTADA.....	i
APROBACIÓN DE LA TUTORA.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD.....	iii
APROBACIÓN DE LOS MIEMBROS DE TRIBUNAL DE GRADO.....	iv
DERECHOS DE AUTOR.....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xv
RESUMEN.....	xvi
SUMMARY.....	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO I.....	1
MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Antecedentes investigativos.....	1
1.1.1 Tubérculos andinos.....	2
1.1.1.1 Oca.....	2
1.1.1.2 Jícama.....	2
1.1.1.3 Mashua.....	3
1.1.1.4 Camote.....	3
1.1.2 Composición química de los tubérculos andinos estudiados.....	3
1.1.3 Propiedades térmicas.....	4
1.1.3.1 Calor específico.....	4
1.1.3.2 Difusividad térmica.....	5
1.1.3.3 Conductividad térmica.....	5
1.2 Objetivos.....	6
1.2.1 Objetivo general.....	6

1.2.2	Objetivos específicos.....	6
1.3	Hipótesis.....	6
1.3.1	Hipótesis nula (H_0).....	6
1.3.2	Hipótesis alternativa (H_1).....	7
1.4	Señalamiento de variables	7
1.4.1	Variable independiente.....	7
1.4.2	Variable dependiente	7
CAPÍTULO II.....		8
MATERIALES Y MÉTODOS		8
2.1	Materiales.....	8
2.1.1	Materia prima	8
2.2	Metodología	8
2.2.1	Determinación de calor específico.....	8
2.2.1.1	Calibración del calorímetro	8
2.2.1.2	Calor específico de la muestra.....	9
2.2.2	Determinación de difusividad térmica.....	9
2.2.3	Determinación de conductividad térmica.....	10
2.2.4	Análisis estadístico y correlación entre las propiedades térmicas y la temperatura o poder de calentamiento.....	11
CAPÍTULO III.....		12
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		12
3.1	Calor específico.....	12
3.2	Difusividad térmica.....	15
3.3	Conductividad térmica.....	18
3.4	Correlaciones de propiedades térmicas.....	21
3.4.1	Correlación entre calor específico y temperatura.....	21
3.4.2	Correlación entre difusividad térmica y temperatura.....	21
3.4.3	Correlación entre conductividad térmica y poder de calentamiento.....	21
CAPÍTULO IV.....		23
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		23
4.1	Conclusiones	23
4.2	Recomendaciones.....	24
MATERIALES DE REFERENCIA		25

5.1 Bibliografía	25
ANEXOS.....	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de un calorímetro para determinar calor específico – Método de mezclas.....	9
Figura 2. Esquema del cilindro empleado para la medición de la difusividad térmica.....	10
Figura 3. Dispositivo para la determinación de la conductividad térmica – Método de la sonda.....	11
Figura 4. Interacción doble de tipo de tubérculo y forma de determinación para calor específico.....	36
Figura 5. Interacción doble de forma de determinación y temperatura para calor específico.....	37
Figura 6. Interacción doble de forma de temperatura y tipo de tubérculo para calor específico.....	37
Figura 7. Interacción doble de tipo de tubérculo y forma de determinación para la difusividad térmica.....	38
Figura 8. Interacción doble de forma de determinación y temperatura para la difusividad térmica.....	39
Figura 9. Interacción doble de temperatura y tipo de tubérculo para la difusividad térmica.....	39
Figura 10. Interacción doble de tipo de tubérculo y forma de determinación para conductividad térmica.....	40
Figura 11. Interacción doble de forma de determinación y poder de calentamiento para conductividad térmica.....	41
Figura 12. Interacción doble de poder de calentamiento y tipo de tubérculo para conductividad térmica.....	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química de los tubérculos andinos.....	4
Tabla 2. Contenido de humedad y carbohidratos en extracto de tubérculos.....	13
Tabla 3. Calor específico de tubérculos andinos.....	14
Tabla 4. Difusividad térmica de tubérculos andinos.....	17
Tabla 5. Conductividad térmica de tubérculos andinos.....	20
Tabla 6. Ecuación de correlación entre calor específico y temperatura.....	21
Tabla 7. Ecuación de correlación entre difusividad térmica y temperatura.....	21
Tabla 8. Ecuación de correlación entre conductividad térmica y poder de calentamiento.....	22
Tabla 9. Calor específico determinado mediante las ecuaciones propuestas por Choi y Okos (1986) para tubérculos enteros.....	33
Tabla 10. Calor específico determinado mediante las ecuaciones propuestas por Choi y Okos (1986) para los extractos de tubérculos.....	33
Tabla 11. Difusividad térmica determinada mediante las ecuaciones propuestas por Choi y Okos (1986) para tubérculos enteros.....	34
Tabla 12. Difusividad térmica determinada mediante las ecuaciones propuestas por Choi y Okos (1986) para los extractos de tubérculos.....	34
Tabla 13. Conductividad térmica determinada mediante las ecuaciones propuestas por Choi y Okos (1986) para tubérculos enteros.....	35
Tabla 14. Conductividad térmica determinada mediante las ecuaciones propuestas por Choi y Okos (1986) para los extractos de tubérculos.....	35
Tabla 15. Análisis de varianza para calor específico.....	36
Tabla 16. Pruebas de múltiple Rango para calor específico por tipo de tubérculos	36
Tabla 17. Prueba de múltiples rangos para calor específico por forma de determinación.....	37
Tabla 18. Prueba de múltiples rangos para calor específico por temperatura.....	37
Tabla 19. Análisis de varianza para difusividad térmica.....	38
Tabla 20. Prueba de múltiples rangos para difusividad térmica por tipo de tubérculo.....	38
Tabla 21. Prueba de múltiples rangos para difusividad térmica por tipo de tubérculo.....	39
Tabla 22. Prueba de múltiples rangos para difusividad térmica por temperatura....	39

Tabla 23. Análisis de varianza para conductividad térmica.....	40
Tabla 24. Pruebas de múltiples rangos para conductividad térmica por tipo de tubérculos.....	40
Tabla 25. Pruebas de múltiples rangos para conductividad térmica por forma de determinación.....	41
Tabla 26. Pruebas de múltiples rangos para conductividad térmica por voltaje.....	41

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Calor específico.....	8
Ecuación 2. Difusividad térmica.....	10
Ecuación 3. Conductividad térmica.....	10

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. RESULTADOS BIBLIOGRÁFICOS.....	33
A.1. Valores bibliográficos determinados por las ecuaciones de Choi y Okos (1986).....	33
ANEXO B. ANOVA - ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	36
B.1. Análisis estadístico de calor específico.....	36
B.2. Análisis estadístico de difusividad térmica.....	38
B.3. Análisis estadístico de conductividad térmica.....	40
ANEXO C. IMÁGENES.....	42
C.1. Tubérculos	
Imagen 1. Camote (<i>Ipomoea batatas</i>).....	42
Imagen 2. Jícama (<i>Smallanthus sonchifolius</i>).....	42
Imagen 3. Mashua (<i>Tropaeolum tuberosum</i>).....	43
Imagen 4. Oca (<i>Oxalis tuberosa</i>).....	43
C.2. Equipos y materiales	
Imagen 9. Calorímetros (calor específico).....	44
Imagen 10. Cilindros de acero (difusividad térmica).....	44
Imagen 11. Método de sonda (conductividad térmica).....	45
Imagen 12. Balanza de humedad (%humedad).....	45

RESUMEN

Actualmente, conocer las propiedades térmicas de los alimentos es muy útil, ya que son datos imprescindibles para la planificación de los diversos tratamientos térmicos; es decir intervienen en la creación de procesos industriales, diseños de equipos, estimación de tiempo de proceso y producción de alimentos aptos para el consumo y con larga vida comercial.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue determinar el efecto de temperatura y del poder de calentamiento en las propiedades térmicas (calor específico, difusividad térmica y conductividad térmica) de cuatro tipos de tubérculos andinos (camote, jícama, mashua y oca), enteros y en extracto. El efecto de la temperatura fue determinado a 8 y 16°C para calor específico mediante el método de las mezclas y para la difusividad térmica a 35 y 60°C por el método de cilindros; mientras que en conductividad térmica se evaluó el efecto del poder de calentamiento a 7.5 y 9 voltios por el método de sonda.

Las propiedades térmicas de los cuatro tubérculos estudiados, se vieron afectas en todos los casos por la composición química, los cambios estructurales de los alimentos, así como por la temperatura y el poder de calentamiento a los que fueron sometidos.

Jícama presentó el valor más alto de calor específico y conductividad térmica, debido al elevado contenido de agua. Mientras que los sólidos totales presentan una relación inversamente proporcional con la difusividad térmica, debido a la resistencia interna que ejercen a la transferencia de calor. Por otra parte, las tres propiedades térmicas estudiadas presentan valores superiores al trabajar con extractos, debido a que la transferencia de calor en líquidos se realiza predominantemente por convección.

Palabras claves: calor específico, difusividad térmica, conductividad térmica, método de mezclas, método de cilindros, método de sonda.

ABSTRACT

The knowledge of the food thermal properties is very useful, because they are essential dates for the planning of various thermal treatments, which are involved in the creation of industrial processes, equipment designs, process time estimation and production of food suitable for consumption and with a long commercial life.

Therefore, the objective of this study was to determine the effect of temperature and heating power on the food thermal properties (specific heat, thermal diffusivity and thermal conductivity) of four types of Andean tubers (sweet potato, jicama, mashua and oca), whole and in extract. The effect of temperature was determined at 8 and 16°C for specific heat by the method of mixtures and for thermal diffusivity at 35 and 60°C by the cylinder method; while thermal conductivity the effect of the heating power at 7.5 and 9 volts was evaluated by the probe method.

The thermal properties of the four tubers studied were affected in all cases by the chemical composition, the structural changes of the food, as well as the temperature and the heating power.

Jicama presented the highest value of specific heat and thermal conductivity, due to the high-water content. While total solids have an inversely proportional relationship with thermal diffusivity, due to the internal resistance they exert to heat transfer. On the other hand, the three thermal properties studied have higher values when working with extracts, because heat transfer in liquids is predominantly carried out by convection.

Keywords: specific heat, thermal diffusivity, thermal conductivity, mixing method, cylinder method, probe method.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes investigativos

Ecuador es considerado uno de los países con mayor dispersión de plantas, semillas, raíces y tubérculos, debido a que dispone de una gran biodiversidad albergada en dos centros florísticos: Andino y Amazónico, mismos que están en franco proceso de erosión genética **(Barrera, 2003)**.

La parte andina es una zona de agricultura tradicional que puede ser considerada como un macrocentro de conservación de la biodiversidad, especialmente de raíces y tubérculos **(Benalcázar, 2011)**, con alrededor de 150.000 hectáreas de cultivos tradicionales. Es probable que ciertas condiciones ecológicas, como por ejemplo la marcada estacionalidad anual en cuanto a temperaturas o precipitaciones, hayan favorecido la evolución de estos cultivos **(Suquilanda, 1984)**.

Las raíces y tubérculos andinos (RTAs), han desempeñado un papel importante en la seguridad alimentaria debido a que presentan nutrientes que los catalogan como alimentos funcionales; es decir, que además de nutrir, son capaces de contribuir en la salud **(Villacrés et al., 2013)**. Sin embargo, la mayoría de ellos están excluidos de los sistemas de producción orientados al mercado.

En Ecuador existe gran biodiversidad de tubérculos que pueden ser aprovechados en diversos procesos de industrias alimentarias. Entre estos cultivos destacan la achira (*Canna edulis*), la maca (*Lepidium meyenii*), la mashua (*Tropaeolum tuberosum*), el miso (*Mirabilis expansa*), la oca (*Oxalis tuberosa*), el melloco (*Ullucus tuberosus*), la jícama (*Smallanthus sonchifolius*), el camote (*Ipomoea batatas*) y la zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhizala*). La mayoría de estos productos no son conocidos por sus propiedades alimentarias y por este motivo no son aprovechados **(Espín, 2013; Guerrero, 2015)**.

Frente a esto, el Instituto Nacional Autónomo de Investigación Agropecuaria (INIAP) en conjunto con el gobierno del Ecuador, buscan rescatar el valor de los recursos genéticos de productos andinos, debido principalmente a que presentan un efecto económico en la agricultura, y por ende en la cultura e historia del país **(Cadima, 2006)**.

1.1.1 Tubérculos andinos

Los tubérculos andinos (TAs) son parte importante de la alimentación de los pueblos. Se observa una alta demanda de estos cultivos en las diferentes regiones del Ecuador, debido a que son un soporte nutricional invaluable. Además, representan el 7.4% del producto interno bruto (PIB) agrícola del Ecuador. El consumo per-cápita promedio de los ecuatorianos de este tipo de alimentos es de 31.8 kilos al año, la gran mayoría se consume en estado fresco y solo el 10% se destina a la industria (**Devaux et al., 2010**).

Existen tubérculos en la región Andina como: camote (*Ipomoea batatas*), jícama (*Smallanthus sonchifolius*), mashua (*Tropaeolum tuberosum*) y oca (*Oxalis tuberosa*) cuyas propiedades térmicas, nutricionales y organolépticas no son conocidas, por lo que se las debe estudiar a profundidad para dar las aplicaciones más adecuadas, permitiendo desarrollar nuevos productos que contribuyan a mejorar la calidad de vida de los ecuatorianos.

1.1.1.1 Oca

La oca (*Oxalis tuberosa*), al igual que otros tubérculos andinos como la papa, papa lisa o el isaño, es un tubérculo originario de la región andina de América, y se produce principalmente entre Perú, Bolivia y Ecuador. En orden de importancia alimenticia y económica, ocupa el segundo lugar después de la papa (**Emswiller, 2002**). Según **National Research Council (1989)**, los tubérculos de oca tienen una alta variación en sus niveles nutritivos. Como promedio posee un 84.1% de agua, 1.1% de proteína, 13.2% de carbohidratos, 0.6% grasa y 1% de fibra. El contenido vitamínico varía, pero puede tener cantidades significativas de retinol (vitamina A) y los tubérculos amargos contienen hasta 500 ppm de ácido oxálico.

1.1.1.2 Jícama

La jícama (*Smallanthus sonchifolius*) es un alimento cuyo valor nutritivo y versatilidad son poco conocidos. La parte importante de la jícama es la raíz tuberosa, misma que contiene una pulpa carnosa, crujiente, firme, blanca, porosa y de buen sabor (**Mora & Morera, 1995**). Se consume en fresco o cocida, y es rica en azúcares y agua (90% de su peso total). Presenta pequeñas cantidades de calcio, hierro y fósforo, y contiene un 10% de almidón de fácil digestión. El contenido de proteína es bajo; sin embargo, los aminoácidos que la constituyen son de considerable interés, debido a que contiene los ocho aminoácidos indispensables para la dieta del hombre (**Burciaga Dávila, 2001**).

1.1.1.3 Mashua

La mashua (*Tropaeolum tuberosum*) es un tubérculo que se encuentra distribuido entre 2.800 y 4.000 msnm en las regiones andinas de Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú, en donde se la puede hallar incluso en forma silvestre. Este tubérculo está compuesto de sólidos en un 20%, de los cuales el 11% es proteína. Algunas variedades pueden contener más de un 12% de proteínas, y es rica en vitaminas tales como B1, B2 y vitamina C (**Espín, 2013**).

1.1.1.4 Camote

El camote (*Ipomoea batatas*), es un tubérculo nativo que tiene una diversidad de usos desde el destinado a la alimentación humana, a la alimentación animal (ganado lechero y porcino), así como para fines industriales en la producción de almidón, alcohol, chifles, harina, etc. (**Nieto et al., 1987**). Este tubérculo se destaca por ser un alimento que proporciona energía, debido a su contenido de carbohidratos totales de 25 a 30%, de los cuales el 98% son considerados fácilmente digeribles y por su contenido de fibra que ayuda a una buena digestión. Además, es considerado de bajo costo y de fácil acceso (**Cobeña et al., 2017**).

1.1.2. Composición química de los tubérculos andinos estudiados

Los tubérculos y raíces andinos poseen características físicas similares; sin embargo, presentan una gran variedad de composiciones químicas, los cuales depende de varios parámetros tales como la variedad genética, edad de maduración de la planta, localización del cultivo y fertilidad del suelo (**Morón, 1999**). El valor nutricional de estos tubérculos muestra una interesante variabilidad especialmente en el contenido de proteína y carbohidratos solubles, lo que da pautas para orientar su uso futuro (**Cadima, 2006**).

Los cuatro tipos de tubérculos cuentan con composiciones químicas diferentes (Tabla 1). En lo que respecta al porcentaje de humedad, mashua y jícama presentan mayor proporción, siendo de esta manera más susceptible a cambios en sus propiedades. Por otra parte, camote presenta la mayor cantidad de materia seca provocando que tenga un valor energético alto en relación con los demás tubérculos. Oca presenta una buena fuente fibra que favorece a regular los niveles de colesterol en la sangre. Y finalmente, la cantidad de ceniza es predominante en oca y camote, lo cual representa el contenido en minerales (hierro, fósforo, calcio). En general la ceniza representa el 5% de la materia seca que contiene estos tubérculos (**Ziegler, 1997**).

Los cultivos andinos son aprovechados por industrias y consumidores debido a que son excelentes fuentes de almidón. En general contienen entre 20 y 25 % de amilosa (**Coultate, 2007**).

Tabla 1. Composición química de los tubérculos andinos

Componentes	Camote	Jícama	Mashua	Oca
Energía (kcal/100g)	114	50	54	61
Humedad (%)	69.9	86.6	87.4	84.1
Carbohidrato (%)	26.3	12	9.8	13.3
Proteína (%)	1.7	0.3	1.5	1
Grasa (%)	0.4	0.3	0.7	0.6
Ceniza (%)	1	0.3	0.6	1
Fibra (%)	0.7	0.5	0.9	1
Almidón (%)	42.6	10.3	46.92	42.17

Fuente: Farinu y Baik (2007); Arteaga y Rodríguez (2016); Morón (1999); Martínez-Bustos et al. (2007); Villacrés et al. (2016)

1.1.3 Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas de los alimentos son parámetros que influyen en la transferencia de calor. Su conocimiento es necesario para el cálculo de procesos; además, son datos esenciales en el diseño de equipos y en la calidad del producto. Están influenciadas en un mayor o menor grado por la temperatura y la composición del producto, durante un tratamiento térmico (**Rahman, 2009**). Las propiedades térmicas de frutas, vegetales y tubérculos son necesarias para calcular la rapidez de calentamiento o enfriamiento o para estimar la cantidad de calor requerida en procesos de: escaldado, pasteurización, evaporación, fritura, congelación, esterilización, secado, entre otras (**Alvis et al., 2009**).

Las principales propiedades térmicas de los alimentos son: conductividad térmica, calor específico y difusividad térmica. Existen otras propiedades de interés, que también son consideradas dentro de este grupo, como son: el punto de congelación inicial, el intervalo de congelación, la cantidad de agua sin congelar, entre otras (**Barreiro & Sandoval, 2006**).

1.1.3.1 Calor específico

El calor específico indica la cantidad de calor requerida para cambiar la temperatura de un material. Las unidades de la capacidad calorífica específica son kJ/kg×K. A diferencia de la conductividad térmica, el calor específico es independiente de la densidad de masa. Por lo tanto, este valor se puede utilizar para calcular la carga de calor impuesta a los equipos de refrigeración, congelación, entre otros (**Turrell & Perry, 1957**).

La capacidad calorífica específica de los productos alimenticios es de suma importancia en el modelado y diseño de procesos de transferencia de calor, junto con otras propiedades termo físicas básicas de los alimentos. Los equipos se basan parcialmente en datos precisos de la capacidad de calor de los productos alimenticios, aunque también se utiliza para obtener entalpía, entropía y otras funciones termodinámicas (**Ramaswamy & Marcotte, 2005**).

1.1.3.2 Difusividad térmica

Esta propiedad es una medida de la cantidad de calor difundida a través de un material en calentamiento o enfriamiento en un tiempo determinado, y está definida como el cociente de la conductividad térmica por el producto de la densidad y el calor específico (**Mohsenin, 1980**). Además, determinan la tasa de propagación de calor a través del alimento (**Fellows, 2009**).

Los valores de difusividad de los alimentos están relacionados con su estructura, composición y estado. La proporción de los componentes mayoritarios en el alimento (agua, proteínas, grasa, carbohidratos y cenizas) determina su difusividad térmica, por lo que alimentos con una elevada humedad presentarán valores de difusividad superiores, en contraposición a lo que ocurrirá en un alimento con un mayor contenido de grasa que presentará una disminución del coeficiente de difusividad térmica (**Ibarz & Ribas, 2005**).

1.1.3.3 Conductividad térmica

La conductividad térmica de los alimentos es considerada una medida de velocidad con la que el calor se transmite a través de un espesor de unidad de ese material cuando existe un gradiente de temperatura, y es expresada en $W/m \times K$ (**Singh & Heldman, 2009**).

Esta propiedad depende de la estructura interna, la humedad, la configuración geométrica, la composición química del material y la temperatura; además, se encuentra asociada con las propiedades del aire, de la grasa y del agua en los alimentos (**Alzate, 2003**). Sin embargo, esta propiedad térmica cambia drásticamente durante la congelación o descongelación en la medida que la fracción de hielo aumenta o disminuya, respectivamente. La conductividad térmica del hielo ($2.2 - 2.5 W/m \times K$) es casi cuatro veces el valor de la conductividad del agua ($0.5 - 0.6 W/m \times K$). Es de esperar que la conductividad del hielo y del agua influyen en mayor grado el valor global de la conductividad térmica del alimento ya que la conductividad térmica de los sólidos es baja ($0.1 - 0.26 W/m \times K$) (**Salvadori, 1994**).

Por lo tanto, los datos de conductividad térmica de alimentos como una función del contenido de humedad, es una de las primeras propiedades requeridas para modelar procesos que involucren transferencia de masa y energía, como se da en los procesos de secado, rehidratación, almacenamiento, entre otros (**Wang & Brennan, 1992**).

La conductividad y la difusividad térmica son afectadas tanto por la composición y la densidad del alimento, como por la temperatura, mientras que el calor específico es afectado principalmente por la composición y la temperatura. Por esto es generalmente más difícil determinar la conductividad o la difusividad térmica que el calor específico (**Murakami & Okos, 1989**).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Determinar el efecto de la temperatura y del poder de calentamiento en las propiedades térmicas de camote (*Ipomoea batatas*), jícama (*Smallanthus sonchifolius*), mashua (*Tropaeolum tuberosum*) y oca (*Oxalis tuberosum*).

1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de la temperatura en el calor específico de oca, jícama, mashua y camote, utilizando el método de Hwang & Hayakawa.
- Evaluar el efecto del poder de calentamiento en la conductividad térmica de oca, jícama, mashua y camote, mediante el método de la sonda.
- Evaluar el efecto de la temperatura en la difusividad térmica de oca, jícama, mashua y camote, tanto enteros como en extracto, mediante el método de Dickerson.

1.3 Hipótesis

1.3.1 Hipótesis nula (H₀)

El tipo de tubérculo, la forma de determinación, la temperatura o el poder de calentamiento no tienen un efecto en las propiedades térmicas: calor específico, conductividad térmica, difusividad térmica, de camote, jícama, mashua y oca.

1.3.2 Hipótesis alternativa (Hi)

El tipo de tubérculo, la forma de determinación, la temperatura o el poder de calentamiento tienen un efecto en las propiedades térmicas: calor específico, conductividad térmica, difusividad térmica, de camote, jícama, mashua y oca.

1.4 Señalamiento de variables

1.4.1 Variable independiente

- Tipo de tubérculo (camote, jícama, mashua y oca).
- Forma de determinación (entero y extracto).
- Temperatura (calor específico: 8 y 16°C; difusividad térmica: 35 y 60°C).
- Poder de calentamiento (conductividad térmica: 7.5 y 9V).

1.4.2 Variable dependiente

- Calor específico.
- Conductividad térmica.
- Difusividad térmica.

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

2.1.1 Materia prima

Los tubérculos andinos utilizados en este trabajo (camote, jícama, mashua y oca) fueron adquiridos en el mercado Mayorista de la ciudad de Ambato.

2.2 Metodología

2.2.1 Determinación de calor específico

2.2.1.1 Calibración del calorímetro

Se utilizó el método de las mezclas, descrito por **Hwang y Hayakawa (1979)**, debido a que es el más utilizado para la determinación de calor específico en alimentos. La muestra del alimento, con temperatura conocida, se colocó en un calorímetro adiabático (recipiente elaborado con material aislante para evitar la pérdida de calor hacia el exterior) que contuvo agua a una temperatura específica, permitiendo determinar la temperatura de equilibrio.

Se colocaron 300 ml de agua (temperaturas: 8 ó 16°C) en un recipiente metálico de aluminio completamente aislado, para evitar la pérdida de calor hacia el exterior (calorímetro adiabático) (Figura 1), y se registró la primera temperatura de equilibrio (calorímetro + agua fría). Seguidamente se añadieron 300 ml de agua a temperatura conocida (ambiente) y se registró la segunda temperatura de equilibrio del sistema (calorímetro + agua fría + agua ambiente).

Las temperaturas de análisis se escogieron en base al estudio realizado por **Alvarado y Aguilera (2001)**, quienes recomiendan trabajar con agua a temperatura menor que la ambiental. Posteriormente se realizó el cálculo del calor específico utilizando la ley de conservación de energía (Ecuación 1).

$$c_{p\ cal} = \frac{[m_a \times c_{pa} \times (T_{ai} - T_e)] - [m_f \times c_{pf} \times (T_e - T_{fi})]}{m_{cal} \times (T_e - T_{f+cal})} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde: $T_{f+cal-i}$ temperatura sistema calorímetro + agua_{fría} (equilibrio 1), T_a temperatura agua_{ambiente}, T_e temperatura sistema calorímetro + agua_{fría} + agua_{ambiente} (equilibrio 2), c_p calor específico (J/g °C), m masa (g). Subíndices: a agua ambiente, f agua_{fría}, cal calorímetro.

2.2.1.2 Calor específico de la muestra

Se realizó de igual forma que el procedimiento experimental del apartado 2.2.1.1, reemplazado el agua ambiente por la muestra de tubérculo entero o en extracto, y se trabajó con relación 1:1 con la finalidad de obtener correlaciones entre la propiedad y la temperatura de determinación.

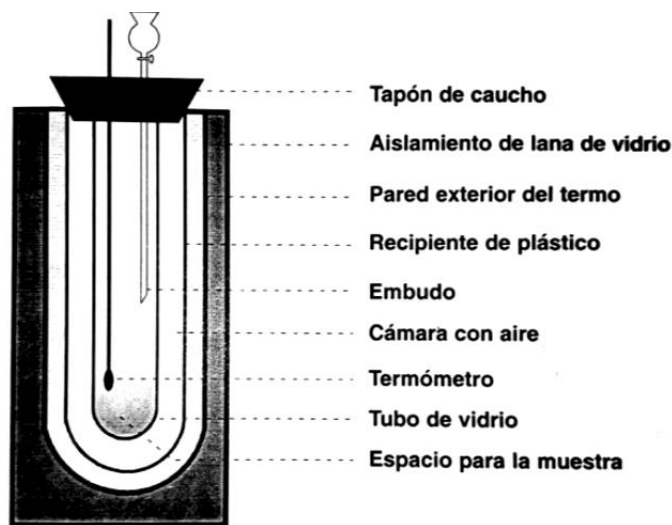


Figura 1. Esquema de un calorímetro para determinar calor específico – Método mezclas
Fuente: Alvarado y Aguilera (2001)

2.2.2 Determinación de difusividad térmica

Se realizó mediante el método descrito por **Dickerson (1965)**. El que consiste en la utilización de un cilindro de acero (con tapas-rosca herméticas del mismo material en los extremos), de dimensiones conocidas (radio interno: 24.75×10^{-3} m; longitud: 248.5×10^{-3} m) y con difusividad térmica estable (1.09×10^{-7} m²s⁻¹) (Figura 2).

Se colocó la muestra (tubérculo entero o extracto) en el cilindro, con la precaución de no dejar espacios con aire. Se cerró completamente el cilindro y se introdujo un termómetro tipo aguja por el eje central de la tapa superior, registrando la temperatura inicial de la muestra que debe ser estable. Posteriormente, el cilindro fue colocado dentro de un baño termostático, previamente estabilizado a la temperatura de trabajo (35 o 65°C) y se registró a intervalos de un minuto el aumento de temperatura de la muestra hasta que llegue a una temperatura de equilibrio.

El cálculo de difusividad térmica se realizó con la Ecuación 2.

$$\alpha = \frac{0,398}{\left[\left(\frac{1}{R^2}\right) + \left(\frac{0,427}{b^2}\right)\right] \times f} \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde: R radio del cilindro (m); b mitad de la altura del cilindro (m) y f tiempo requerido para que la sección recta del historial de temperatura atraviese un ciclo logarítmico (s).

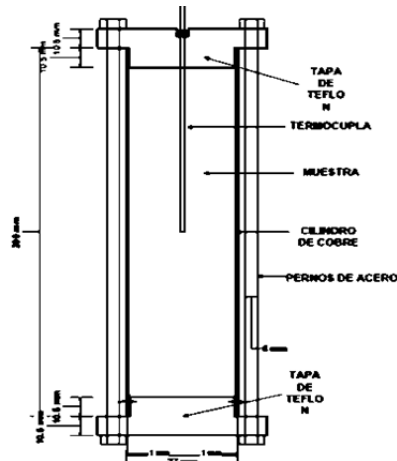


Figura 2. Esquema del cilindro empleado para la medición de la difusividad térmica
Fuente: Huamán Castilla et al. (2016)

2.2.3 Determinación de conductividad térmica

Se utilizó el método de la sonda establecido por **Sweat y Haugh (1974)**. El equipo consta de un cilindro de aluminio (longitud: 15 cm, diámetro interno: 4 cm y espesor: 2 cm), con una tapa que posee un orificio central para introducir la sonda que suministra el calor (**Conrado & Acurio, 2018**). La sonda está construida con acero inoxidable y compuesta por un termopar tipo T y un hilo de calentamiento (Figura 3).

Se colocó la muestra (tubérculo entero o en extracto) dentro del cilindro cerrado de aluminio. A continuación, se introdujo la sonda de acero inoxidable, la que suministró a la muestra una corriente constante de 7.5 voltios (7.11 W) o 9 voltios (10.24 W) y el termopar registró la variación de temperatura de la muestra con el tiempo (5 minutos por muestra). El cálculo de la conductividad térmica se realizó utilizando la Ecuación 3

$$k = \frac{Q}{4\pi(\Delta T)} * \ln \frac{t_2}{t_1} \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde: $\ln(t_2/t_1)$ logaritmo natural del tiempo; ΔT variación de la temperatura entre el alimento y el medio (°C) y Q potencia generada por la sonda durante el calentamiento (W/m).

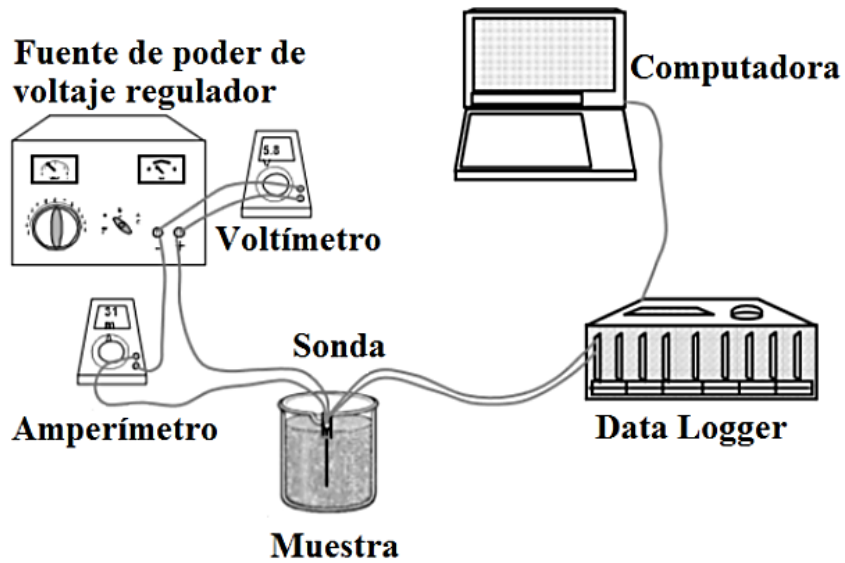


Figura 3. Dispositivo para la determinación de conductividad térmica – Método de la sonda
Fuente: Acurio et al. (2016)

2.2.4 Análisis estadístico y correlación entre las propiedades térmicas y la temperatura o poder de calentamiento

Las correlaciones entre las propiedades térmicas y las variables de estudio se hallaron mediante diseño experimental utilizando el software estadístico Statgraphics, y un arreglo factorial $A \times B \times C$ con un nivel de confianza del 95%. Para dicho análisis se utilizaron los resultados de la tesis de **Conrado y Acurio (2018)**, así como los resultados del presente estudio, debido a que ambos fueron obtenidos bajo las mismas condiciones de experimentación.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Calor específico

Los valores obtenidos en esta propiedad térmica guardan relación con los valores obtenidos por **Sulla Huamán (2016)**, para zumo de naranja con 86.9% de humedad, con un valor de 3.818 kJ/kg°C; al igual que con los valores reportados por **Lewis (1993)**, para zumo de melón con 92% de humedad, con un valor de 3.94 kJ/kg°C.

El análisis estadístico del calor específico evidenció que existen diferencias significativas en las tres variables de estudio (tipo de tubérculo, forma de determinación y temperatura) ($p < 0.05$). En cuanto al tipo de tubérculo se observan valores superiores en jícama y valores inferiores en camote, con diferencia significativa entre ellas. Esto se debe a que la jícama es un tubérculo que presenta en su composición nutricional el menor porcentaje de sólidos totales y elevada humedad (Tabla 1), caso contrario a lo que ocurre con camote. Esto guarda concordancia con el trabajo de investigación de **Coimbra et al. (2006)**, quienes mencionan que el contenido de agua influye considerablemente sobre el calor específico de los alimentos. Por otra parte, mashua y oca no presentan diferencias significativas entre ellas, esto puede deberse a la composición similar que estos tubérculos poseen, especialmente en cuanto a su cantidad de almidón (42.1% en oca y 46.9% en mashua) (**Villacrés et al., 2016**).

Por otro lado, al analizar la forma de determinación, se observan valores superiores en los extractos a comparación de los tubérculos enteros. Esto ocurre debido a que los valores de calor específico también son dependientes de los cambios estructurales y del estado de agregación. Por lo tanto, un alimento en estado líquido reduce sus sólidos totales, permitiendo que sus partículas tiendan a moverse en diferentes velocidades, provocando el ingreso rápido de calor y por ende la elevación del calor específico (**Flores & Valdez, 2006**).

Al analizar la interacción doble tipo de tubérculo: forma de determinación (Figura 4), se observa que la jícama presenta mayor diferencia entre el tubérculo entero y el extracto; esto puede deberse a la baja cantidad de sólidos totales que el extracto presenta debido al proceso de extracción, en el que se pierde gran parte de carbohidratos y fibra, efecto que por ende influye en un aumento en el porcentaje de humedad (Tabla 2).

Tabla 2. Contenido de humedad y carbohidratos en extracto de tubérculos

Componentes	Tipo de tubérculo			
	Camote	Jícama	Mashua	Oca
Humedad (%)	73.28	91.29	91.96	88.15
Carbohidratos (%)	24.3	6.2	8.7	10.24

Fuente: Autora

Con respecto, a la variable temperatura se obtienen valores superiores a 16°C. Este efecto se observa también en los valores de calor específico y calor latente de fusión del agua pura (Alva, 1990), provocando que exista una relación directa entre la temperatura y el calor específico del alimento.

Al analizar la interacción doble entre la forma de determinación y la temperatura (Figura 6), se observa que solamente a 4°C los tubérculos presentan diferencias significativas en los valores de calor específico. Este fenómeno puede relacionarse con el hecho de que a esta temperatura el agua está cerca de su punto de congelación, reduciendo el efecto de vibraciones moleculares para el paso de calor y disminuyendo al calor específico alrededor de la mitad del agua ($c_{p \text{ hielo}}: 2.09 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$) (Rolfe, 1968). El fenómeno previamente discutido, no se observó en el resto de las temperaturas estudiadas (8, 12 y 16°C) evidenciando que el calor específico se ve afectado en mayor grado por el contenido de agua antes que por el efecto de la temperatura (Giraldo-Gómez et al., 2010).

Finalmente, se calcularon los valores de calor específico de los cuatro tubérculos estudiados mediante la ecuación propuestas por Choi y Okos (1986). Esta ecuación es sugerida para un amplio catálogo de alimentos y se encuentra en función de la composición nutricional y de la temperatura.

Al comparar los resultados experimentales con los valores calculados no se observan diferencias (Tabla 3), lo que garantiza la confiabilidad del método de Hwang y Hayakawa (1979), utilizado para la determinación experimental. Además, esta comparación corrobora lo reportado por Singh y Heldman (2009), quienes indica que el calor específico es influenciado por la composición del alimento, la temperatura y la presión a la cual se está trabajando. En este trabajo la presión se consideró constante por lo que no afectó a los resultados experimentales.

Tabla 3. Calor específico de tubérculos andinos

Tubérculo	Forma de determinación	Temperatura	Calor específico (kJ/kg°C)	
			Experimental	Bibliográfico
Camote	Entero	4	2.8716 ± 0.19 ^{c, n, z}	3.3944
		8	3.1524 ± 0.08 ^{c, n, y}	3.3964
		12	3.2192 ± 0.03 ^{c, n, y}	3.3986
		16	3.31 ± 0.09 ^{c, n, x}	3.4007
	Extracto	4	3.0205 ± 0.24 ^{c, m, z}	3.4818
		8	3.2786 ± 0.04 ^{c, m, y}	3.4836
		12	3.3063 ± 0.30 ^{c, m, y}	3.4854
		16	3.3418 ± 0.10 ^{c, m, x}	3.4874
Jícama	Entero	4	3.0365 ± 0.04 ^{a, n, z}	3.8276
		8	3.3338 ± 0.06 ^{a, n, y}	3.8285
		12	3.3816 ± 0.01 ^{a, n, y}	3.8294
		16	3.7033 ± 0.09 ^{a, n, x}	3.8305
	Extracto	4	3.5332 ± 0.12 ^{a, m, z}	3.9513
		8	3.5537 ± 0.08 ^{a, m, y}	3.9519
		12	3.71 ± 0.09 ^{a, m, y}	3.9526
		16	3.7372 ± 0.09 ^{a, m, x}	3.9534
Mashua	Entero	4	3.072 ± 0.10 ^{b, n, z}	3.8696
		8	3.2304 ± 0.15 ^{b, n, y}	3.8703
		12	3.2361 ± 0.09 ^{b, n, y}	3.8712
		16	3.7203 ± 0.12 ^{b, n, x}	3.8722
	Extracto	4	3.1221 ± 0.11 ^{b, m, z}	3.9699
		8	3.2466 ± 0.08 ^{b, m, y}	3.9703
		12	3.2501 ± 0.05 ^{b, m, y}	3.9709
		16	3.7418 ± 0.07 ^{b, m, x}	3.9716
Oca	Entero	4	2.9303 ± 0.16 ^{b, n, z}	3.7804
		8	3.2742 ± 0.02 ^{b, n, y}	3.7814
		12	3.3689 ± 0.46 ^{b, n, y}	3.7826
		16	3.5206 ± 0.06 ^{b, n, x}	3.7838
	Extracto	4	3.1046 ± 0.27 ^{b, m, z}	3.8711
		8	3.4059 ± 0.07 ^{b, m, y}	3.8718
		12	3.4824 ± 0.05 ^{b, m, y}	3.8727
		16	3.554 ± 0.07 ^{b, m, x}	3.8737

Superíndices diferentes entre filas indican diferencia significativa al 95% de confianza. a, b, c: diferencias entre tipos de tubérculos; m, n: diferencias entre forma de determinación; x, y, z: diferencias entre temperatura.

3.2 Difusividad térmica

En el análisis estadístico de difusividad térmica muestra diferencia significativa en las tres variables de estudio ($p < 0.05$). Con respecto, a la variable “tipo de tubérculo”, se observan valores superiores en jícama y mashua, sin diferencia significativa entre ellas. Esta tendencia puede depender de la elevada fracción de agua que contienen estos tipos de tubérculos (86.6 y 87.4% respectivamente); ya que el alto contenido de humedad conlleva a una aceleración en la propagación de calor (**Unklesbay et al., 1992**).

Mientras que en camote se observan valores inferiores, con diferencia significativa frente el resto de los tubérculos. El camote tiene como principal componente los carbohidratos, siendo el almidón el más predominante con un contenido de hasta el 42.6% (**Ly, 2009**). La dependencia con el contenido de almidón se debe a que la difusividad térmica se ve alterada por la gelatinización del almidón, proceso que afecta la estructura celular del tubérculo e incrementa la resistencia interna al movimiento de agua, dando como resultado un descenso en el valor de esta propiedad térmica (**Tovilla, 2015**). Finalmente, oca presenta un valor intermedio debido a que su composición de humedad y sólidos totales no se encuentra dentro de los límites previamente discutidos.

En cuanto a la variable forma de determinación, se observan valores superiores en los extractos con diferencia significativa con los resultados obtenidos en los tubérculos enteros, siendo similar a la tendencia discutida en calor específico. Los valores altos en extracto tienen relación con el efecto de transmisión de calor por convección que se presenta en alimentos fluidos, el cual crea un incremento del movimiento de las partículas presentes de forma gradual, aumentando significativamente la proporción del calor dentro del cilindro que contiene la muestra, generando velocidad de calentamiento rápido y tiempos reducidos (**Muñoz, 2002**). Un efecto similar se ha observado en pulpa de naranjilla, (**Alvarado, 1994**), jugo de ciruela (**Gabas et al., 2005**) y pulpa del meollo de la caña de azúcar (**Garea et al.**).

Según **Rao y Anantheswaran (1988)**, los factores que más influyen en esta propiedad son: la relación sólido-líquido, la consistencia del alimento y la velocidad de transmisión de calor hacia el centro de la muestra. Por otra parte, **Fellows (2009)**, menciona que la difusividad térmica está relacionada con la conductividad térmica, densidad y calor específico del producto para la tasa de propagación de calor a través del alimento. Es decir, cuando un alimento posea una capacidad calorífica baja y una densidad y conductividad térmica altas, la difusividad térmica será relativamente alta (**Rodas, 2019**).

Por otra parte, la interacción doble tipo de tubérculo y forma de determinación muestra que camote es el único tubérculo que no presenta una diferencia extensa entre la muestra entera y en extracto (Figura 7). Observando la composición de este tubérculo se destaca el alto porcentaje de carbohidratos que presenta (Tabla 2), mismo que se conserva incluso después del proceso de extracción, lo que influye en el mínimo cambio observado en esta propiedad.

Al analizar la variable de temperatura, se observan que existen diferencias significativas entre todos los valores evaluados ($p \leq 0.05$). Los valores más altos se observan a 80°C debido a que un incremento de calor causa un movimiento más rápido de las moléculas de un alimento, provocando que la energía cinética de las moléculas se incremente a medida que el calor es absorbido (**Karel et al., 1975**). De forma contraria, los valores más bajos se observaron a 35°C , debido a que el ingreso de calor hacía las muestras se considera lento. Es decir, existe una dependencia lineal de la difusividad térmica con la temperatura, lo que indica que a mayor temperatura de exposición, menor será el tiempo necesario para alcanzar la temperatura deseada (**Alvarado, 1994**). Resultado semejante se observó en pulpa de yacón, con difusividades térmicas de 1.216×10^{-7} y $1.779 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a 45 y 80°C respectivamente (**Jara, 2012**).

Sin embargo, al analizar la interacción doble entre “tipo de tubérculo” y “temperatura” (Figura 9), se observa que en camote y en oca los valores no fluctúan considerablemente; mientras que para el resto de los tubérculos el aumento más importante se da entre 35 y 60°C . Aparentemente, las variaciones amplias de temperatura generan un aumento significativo de esta propiedad térmica. Según **Rubiano et al. (2015)**, la difusividad térmica es más relevante cuanto la temperatura se incrementa en intervalos mayores a 10°C , debido al aumento de la velocidad de transferencia de calor. Este efecto fue observado también en pulpa de Macambo con valores de $1.731 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a 50°C y $1.755 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a 60°C (**Ballón, 2016**).

Finalmente se observa que todos los resultados experimentales se encuentran en el rango de 1 a $2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, similar a los valores reportados en diferentes alimentos (**Peleg & Bagley, 1983**), y es directamente proporcional a las temperaturas analizadas. A pesar de ello, en el análisis estadístico se observó que existen diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los valores experimentales y bibliográficos obtenidos mediante la ecuación de **Choi y Okos (1986)**. Esto puede deberse al ingreso de aire en los cilindros, lo que ejerce un efecto de convección y con ello modifica la velocidad de propagación de calor (**Sakiyama et al., 1999**).

Tabla 4. Difusividad térmica de tubérculos andinos

Tubérculo	Forma de determinación	Temperatura	Difusividad térmica m ² /s	
			Experimental	Bibliográfico
Camote	Entero	35	$1.001 \times 10^{-7} \pm 4.4 \times 10^{-9 \text{ c, n, z}}$	1.345×10^{-7}
		50	$1.001 \times 10^{-7} \pm 3.7 \times 10^{-10 \text{ c, n, y}}$	1.404×10^{-7}
		60	$1.012 \times 10^{-7} \pm 9.8 \times 10^{-9 \text{ c, n, x}}$	1.437×10^{-7}
		80	$1.04 \times 10^{-7} \pm 2.3 \times 10^{-9 \text{ c, n, w}}$	1.49×10^{-7}
	Extracto	35	$1.038 \times 10^{-7} \pm 1.3 \times 10^{-9 \text{ c, m, z}}$	1.362×10^{-7}
		50	$1.042 \times 10^{-7} \pm 1.7 \times 10^{-9 \text{ c, m, y}}$	1.421×10^{-7}
		60	$1.062 \times 10^{-7} \pm 2.1 \times 10^{-9 \text{ c, m, x}}$	1.455×10^{-7}
		80	$1.065 \times 10^{-7} \pm 3.6 \times 10^{-9 \text{ c, m, w}}$	1.508×10^{-7}
Jícama	Entero	35	$1.121 \times 10^{-7} \pm 5.1 \times 10^{-9 \text{ a, n, z}}$	1.434×10^{-7}
		50	$1.199 \times 10^{-7} \pm 2.1 \times 10^{-9 \text{ a, n, y}}$	1.495×10^{-7}
		60	$1.213 \times 10^{-7} \pm 6.6 \times 10^{-9 \text{ a, n, x}}$	1.53×10^{-7}
		80	$1.449 \times 10^{-7} \pm 1.7 \times 10^{-9 \text{ a, n, w}}$	1.585×10^{-7}
	Extracto	35	$1.476 \times 10^{-7} \pm 9.1 \times 10^{-9 \text{ a, m, z}}$	1.461×10^{-7}
		50	$1.577 \times 10^{-7} \pm 7.1 \times 10^{-9 \text{ a, m, y}}$	1.523×10^{-7}
		60	$1.684 \times 10^{-7} \pm 8.8 \times 10^{-9 \text{ a, m, x}}$	1.558×10^{-7}
		80	$1.725 \times 10^{-7} \pm 1.2 \times 10^{-8 \text{ a, m, w}}$	1.614×10^{-7}
Mashua	Entero	35	$1.122 \times 10^{-7} \pm 9.2 \times 10^{-9 \text{ a, n, z}}$	1.447×10^{-7}
		50	$1.140 \times 10^{-7} \pm 2.8 \times 10^{-9 \text{ a, n, y}}$	1.508×10^{-7}
		60	$1.280 \times 10^{-7} \pm 2.0 \times 10^{-8 \text{ a, n, x}}$	1.543×10^{-7}
		80	$1.398 \times 10^{-7} \pm 1.3 \times 10^{-9 \text{ a, n, w}}$	1.599×10^{-7}
	Extracto	35	$1.34 \times 10^{-7} \pm 5.5 \times 10^{-9 \text{ a, m, z}}$	1.463×10^{-7}
		50	$1.534 \times 10^{-7} \pm 5.1 \times 10^{-9 \text{ a, m, y}}$	1.525×10^{-7}
		60	$1.596 \times 10^{-7} \pm 7.9 \times 10^{-9 \text{ a, m, x}}$	1.56×10^{-7}
		80	$1.621 \times 10^{-7} \pm 1.9 \times 10^{-9 \text{ a, m, w}}$	1.616×10^{-7}
Oca	Entero	35	$1.047 \times 10^{-7} \pm 2.1 \times 10^{-9 \text{ b, n, z}}$	1.432×10^{-7}
		50	$1.059 \times 10^{-7} \pm 4.0 \times 10^{-9 \text{ b, n, y}}$	1.493×10^{-7}
		60	$1.078 \times 10^{-7} \pm 1.8 \times 10^{-8 \text{ b, n, x}}$	1.528×10^{-7}
		80	$1.087 \times 10^{-7} \pm 1.2 \times 10^{-8 \text{ b, n, w}}$	1.583×10^{-7}
	Extracto	35	$1.257 \times 10^{-7} \pm 3.3 \times 10^{-9 \text{ b, m, z}}$	1.442×10^{-7}
		50	$1.379 \times 10^{-7} \pm 4.8 \times 10^{-9 \text{ b, m, y}}$	1.503×10^{-7}
		60	$1.497 \times 10^{-7} \pm 8.5 \times 10^{-9 \text{ b, m, x}}$	1.538×10^{-7}
		80	$1.538 \times 10^{-7} \pm 5.9 \times 10^{-9 \text{ b, m, w}}$	1.593×10^{-7}

Superíndices diferentes entre filas indican diferencia significativa al 95% de confianza. a, b, c: diferencias entre tipos de tubérculos; m, n: diferencias entre forma de determinación; w, x, y, z: diferencias entre temperatura.

3.3 Conductividad térmica

En el análisis estadístico de conductividad térmica se observó un comportamiento similar al resto de las propiedades térmicas estudiadas (calor específico y difusividad térmica); es decir, se presentan diferencias significativas en las tres variables de estudio ($p < 0.05$). Al analizar el tipo de tubérculo se observan valores superiores en mashua y jícama, sin diferencia significativa entre ellas. Esto guarda relación con su composición, especialmente al comparar la elevada cantidad de humedad (Tabla 1), aparentemente el agua contribuye a que los valores de esta propiedad térmica cambien mayoritariamente, aunque su estructura también es un factor importante (**Lind, 1991**). Por otra parte, se observan valores inferiores en camote, en este caso la tendencia puede deberse a que la conductividad térmica disminuye en presencia de altos porcentajes de carbohidratos, grasas y proteínas (**Tavman & Tavman, 1999**).

En cuanto a la variable “forma de determinación”, se observan valores superiores en los extractos, con diferencias significativas con las muestras analizadas enteras ($p < 0.05$). Esto se produce debido a los cambios estructurales que se producen en los alimentos al pasar de un estado o fase sólido a líquido. Además, según **Zambrano Del Pino y Yupanqui Vargas (2016)**, la conductividad térmica en alimento enteros también se ve afectada por factores que provocan la resistencia del paso de flujo de calor como: la densidad, tamaño, forma, homogeneidad, disposición de espacios vacíos, diámetro de la fibra, tamaño de los poros, estructura celular y porosidad de la matriz alimentaria en donde se encuentra aire atrapado. El aire es uno de los factores más considerados, debido a que provoca una disminución de esta propiedad térmica ya que actúa como un aislante por su baja conductividad ($k_{\text{aire}}: 0.024 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) (**García, 2010**).

Por lo tanto, la variabilidad de la composición y el estado de la estructura celular en los distintos tubérculos tiene un papel importante para la determinación de esta propiedad térmica. Estos enunciados guardan concordancia con estudios realizados por **Rahman (1995)**, quien presenta valores de conductividad térmica de manzana en estados y contenidos de agua diferentes, siendo mayor el valor para el zumo de manzana ($k = 0,554 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) con humedad 87.2%, frente a manzana entera ($k = 0.415 \text{ W/m}^\circ\text{C}$). En este sentido, **Ríos (1996)**, asegura que en estado sólido la transferencia de calor se da a través de la interacción de electrones libres; mientras que, en estado líquido, como en el caso de los diferentes extractos, se realiza por movimiento molecular.

Con respecto al análisis de poder de calentamiento, se muestra valores superiores a 9 voltios mostrando diferencia significativa con el menor voltaje analizado (5 V). Este efecto se debe a que la fuente de calor lineal que energiza la muestra genera un aumento de temperatura en el alimento y con ello un aumento también de la conductividad térmica (**Baghe-Khandan et al., 1981**). Similar efecto se observó en un estudio realizado para carne de calamar (**Rahman & Potluri, 1991**). Además, las variaciones mínimas de voltaje (entre 7.5 y 9 V), no provocan cambios representativos en esta propiedad térmica ($p < 0.05$).

Al analizar las interacciones dobles en todos los casos no se observan diferencias significativas. Solamente se destaca el comportamiento de camote y oca al analizarlos frente al poder de calentamiento, mostrando un aumento ligeramente superior directamente proporcional con los voltios suministrados por el equipo.

Por otra parte, los valores obtenidos en conductividad térmica de camote (Tabla 5) presentan una diferencia notable con los reportados por **Farinu y Baik (2007)** ($0.49 \pm 0.038 \text{ W/m}^\circ\text{C}$). Esta variación se debe a los diferentes porcentajes de humedad que las muestras poseen (45-75%) y a las diferentes temperaturas de determinación a las que se realizaron los estudios ($20.5\text{-}60^\circ\text{C}$) (**Lozano et al., 1979**).

Por último, no se observan diferencia significativa entre los valores experimentales y bibliográficos obtenidos mediante las ecuaciones de **Choi y Okos (1986)**. Esto se debe a que el método de sonda es relativamente confiable para medir la conductividad térmica directamente en tiempo de medición cortos. Además, **Arancibia (2013)**, menciona que la metodología de sonda térmica es ajustable para todo tipo de productos en estado sólido o líquido, permitiendo alcanzar apenas una incertidumbre del 1%.

Tabla 5. Conductividad térmica de tubérculos andinos

Tubérculo	Forma de determinación	Poder de calentamiento (voltaje)	Conductividad térmica (W/m°C)	
			Experimental	Bibliográfico
Camote	Entero	5	0.5126 ± 0.01 ^{c, n, y}	0.5223
		7.5	0.5375 ± 0.01 ^{c, n, x}	0.5354
		9	0.5539 ± 0.01 ^{c, n, x}	0.5365
	Extracto	5	0.5247 ± 0.01 ^{c, m, y}	0.5391
		7.5	0.5552 ± 0.03 ^{c, m, x}	0.5524
		9	0.5712 ± 0.03 ^{c, m, x}	0.5536
Jícama	Entero	5	0.577 ± 0.02 ^{a, n, y}	0.569
		7.5	0.5957 ± 0.02 ^{a, n, x}	0.5824
		9	0.6081 ± 0.02 ^{a, n, x}	0.5836
	Extracto	5	0.604 ± 0.03 ^{a, m, y}	0.5818
		7.5	0.6087 ± 0.01 ^{a, m, x}	0.5953
		9	0.6113 ± 0.02 ^{a, m, x}	0.5965
Mashua	Entero	5	0.6006 ± 0.01 ^{a, n, y}	0.5686
		7.5	0.6058 ± 0.01 ^{a, n, x}	0.5821
		9	0.613 ± 0.01 ^{a, n, x}	0.5833
	Extracto	5	0.6035 ± 0.01 ^{a, m, y}	0.5887
		7.5	0.6097 ± 0.01 ^{a, m, x}	0.6023
		9	0.6247 ± 0.02 ^{a, m, x}	0.6035
Oca	Entero	5	0.5367 ± 0.02 ^{b, n, y}	0.5607
		7.5	0.5854 ± 0.01 ^{b, n, x}	0.5741
		9	0.589 ± 0.01 ^{b, n, x}	0.5753
	Extracto	5	0.5494 ± 0.02 ^{b, m, y}	0.5786
		7.5	0.5903 ± 0.02 ^{b, m, x}	0.5921
		9	0.5932 ± 0.03 ^{b, m, x}	0.5934

Superíndices diferentes entre filas indican diferencia significativa al 95% de confianza. a, b, c: diferencias entre tipos de tubérculos; m, n: diferencias entre forma de determinación; x, y: diferencias entre temperatura.

3.4 Correlaciones de propiedades térmicas

3.4.1 Correlación entre calor específico y temperatura

La Tabla 6, se muestra las ecuaciones de correlación empírica para calor específico frente a temperatura. En la mayoría de los casos se ajustó a un modelo potencial con elevados coeficientes de correlación (r^2). Estos modelos matemáticos son una opción rápida para predecir valores de calor específico de los tubérculos estudiados.

Tabla 6. Ecuación de correlación entre calor específico y temperatura

Tubérculo	Entero	r^2	Extracto	r^2
Camote	$c_p = 2.5151 \times T^{0.1009}$	0.97	$c_p = 2.7589 \times T^{0.0729}$	0.90
Jícama	$c_p = 2.5281 \times T^{0.1298}$	0.92	$c_p = 3.3287 \times T^{0.039}$	0.90
Mashua	$c_p = 2.5207 \times T^{0.1439}$	0.99	$c_p = 2.5664 \times T^{0.1173}$	0.78
Oca	$c_p = 2.4657 \times T^{0.1289}$	0.98	$c_p = 2.7354 \times T^{0.0973}$	0.96

3.4.2 Correlación entre difusividad térmica y temperatura

La Tabla 7, muestra las ecuaciones de correlación empírica para difusividad térmica frente a temperatura. Al igual que el calor específico, se ajustaron a modelos potenciales, mismos que permitirán predecir valores de difusividad térmica de los tubérculos estudiados. Además, mediante los valores de correlación, se puede evidenciar que las variables se ajustan mejor al trabajar con los extractos.

Tabla 7. Ecuación de correlación entre difusividad térmica y temperatura

Tubérculo	Entero	r^2	Extracto	r^2
Camote	$\alpha = 8 \times 10^{-8} T^{0.0581}$	0.93	$\alpha = 9 \times 10^{-8} T^{0.0333}$	0.93
Jícama	$\alpha = 4 \times 10^{-8} T^{0.3019}$	0.89	$\alpha = 7 \times 10^{-8} T^{0.1981}$	0.96
Mashua	$\alpha = 4 \times 10^{-8} T^{0.2999}$	0.94	$\alpha = 6 \times 10^{-8} T^{0.2331}$	0.95
Oca	$\alpha = 9 \times 10^{-8} T^{0.055}$	0.97	$\alpha = 5 \times 10^{-8} T^{0.2492}$	0.99

3.4.3 Correlación entre conductividad térmica y poder de calentamiento

Finalmente, la Tabla 8 muestra las ecuaciones de correlación empírica exponencial entre la conductividad térmica y el poder de calentamiento. De acuerdo con los valores de correlación (r^2), esta es la propiedad térmica que más se ajusta a la variable independiente de estudio (poder de calentamiento), llegando incluso a obtenerse correlaciones perfectas en el caso de camote y jícama, en las dos formas de determinación (entero y extracto).

Tabla 8. Ecuación de correlación entre conductividad térmica y poder de calentamiento

Tubérculo	Entero	r²	Extracto	r²
Camote	$k = 0.4654 \times e^{(0.0193 \times V)}$	0.99	$k = 0.472 \times e^{(0.0213 \times V)}$	0.99
Jícama	$k = 0.5403 \times e^{(0.0131 \times V)}$	0.99	$k = 0.5951 \times e^{(0.003 \times V)}$	0.99
Mashua	$k = 0.5854 \times e^{(0.0049 \times V)}$	0.95	$k = 0.5777 \times e^{(0.0082 \times V)}$	0.87
Oca	$k = 0.4785 \times e^{(0.0244 \times V)}$	0.90	$k = 0.4996 \times e^{(0.0202 \times V)}$	0.90

Las ecuaciones de las correlaciones obtenidas de las tres propiedades térmicas tuvieron semejanza con las obtenidas para jugo de naranja (**Telis-Romero et al., 1998**). Esta similitud respalda la presente investigación, debido a que fue realizada mediante los mismos métodos establecidos en este estudio.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Las propiedades térmicas de los cuatro tubérculos estudiados, se vieron afectas en todos los casos por la composición química, los cambios estructurales de los alimentos, así como por la temperatura y el poder de calentamiento a los que fueron sometidos.
- Jícama es el tubérculo que presenta el valor más elevado de calor específico, debido a la influencia del contenido de agua, evidenciando así la directa dependencia de este componente con esta propiedad térmica. Y de manera contraria, se evidenció que el calor específico presenta una relación inversamente proporcional con el porcentaje de materia seca de las muestras.
- La difusividad térmica presenta una relación directa con la temperatura, a causa del aumento de calor que provoca un movimiento más rápido de las moléculas de un alimento, induciendo que la energía cinética de las mismas se incremente a medida que el calor es absorbido. Mientras que, los sólidos totales presentan una relación inversamente proporcional, debido a la resistencia interna que ejercen a la transferencia de calor, dando como resultado un descenso de esta propiedad térmica. De todos los componentes, el almidón es el que influye en mayor proporción debido a que forma una barrera gelificante que impide el ingreso rápido del flujo de calor.
- La conductividad térmica presenta una relación directamente proporcional con el contenido de humedad. Además, esta propiedad está relacionada con la estructura interna y la porosidad de los tubérculos, siendo estos factores capaces de provocar una disminución considerable de esta propiedad térmica.
- Las tres propiedades térmicas estudiadas presentan valores superiores al trabajar con extractos, debido a que la transferencia de calor en líquidos se realiza predominantemente por convección, mecanismo en el que se incrementa el movimiento de las partículas presentes de forma gradual, aumentando

significativamente la proporción del calor en alimento con velocidad de calentamiento rápido y tiempos reducidos.

- Los valores de calor específico y conductividad térmica no presentan diferencia significativa con respecto a los valores bibliográficos obtenidos mediante ecuaciones empíricas, debido a la confiabilidad de los métodos. Sin embargo, la difusividad térmica presenta variaciones debido a que los instrumentos utilizados facilitan el ingreso de aire, y éste a su vez dificulta la propagación de calor.

4.2 Recomendaciones

- Evaluar las propiedades térmicas de las mismas matrices alimenticias mediante otro tipo de métodos para corroborar los valores de calor específico, difusividad térmica y conductividad térmica obtenidos.

MATERIALES DE REFERENCIA

5.1 Bibliografía

- Acurio, L., Zamora, A., Salazar, D., Pérez, L., & Valencia, A. (2016). Propiedades físicas, químicas, térmicas y nutricionales de la badea (*Passiflora quadrangularis*). *Agroindustrial Science*, 5(2), 95-101.
- Alva, J. (1990). *Estudio de los parámetros termodinámicos de congelamiento del caracol (Thais chocolata) precocido*". Tesis UNALM. Lima-Perú.
- Alvarado. (1994). Propiedades físicas de frutas. IV. Difusividad y conductividad térmica efectiva de pulpas. *Latin American Applied Research*, 24, 41-47.
- Alvarado, & Aguilera. (2001). *Métodos para medir propiedades físicas en industrias de alimentos*.
- Alvis, A., Cortés, L. E., & Páez, M. (2009). Transferencia de Calor y Materia durante la Fritura de Trozos de Ñame (*Dioscorea alata*). *Información tecnológica*, 20(1), 99-109.
- Alzate, C. E. O. (2003). *Procesamiento de alimentos*: Univ. Nacional de Colombia.
- Arancibia, P. M. (2013). *Medida de la conductividad térmica con el método de la aguja térmica, basado en la fuente lineal de calor transitorio, para su aplicación en los cerramientos de adobes y bloques de tierra comprimida*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Arteaga, I. E., & Rodríguez, K. E. (2016). *Bondades medicinales de la jícama (smallanthus sonchifolius)-revisión bibliográfica, 2014-2015*.
- Baghe-Khandan, M., Choi, Y., & Okos, M. R. (1981). Improved line heat source thermal conductivity probe. *Journal of food science*, 46(5), 1430-1432.
- Ballón, P. S. (2016). Determinación de las propiedades termofísicas de la pulpa de Macambo (*theobroma bicolor*) a diferentes temperaturas.

- Barreiro, J. A., & Sandoval, A. J. (2006). *Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas*: Equinoccio.
- Barrera, V. H. (2003). *Raíces y Tubérculos Andinos: Alternativas para la conservación y uso sostenible en el Ecuador* (Vol. 4): International Potato Center.
- Benalcázar, R. B. M. (2011). *Determinación de las características físicas y químicas de la Zanahoria Blanca (arracacia xanthorrhiza bancroft) proveniente de la Zona de San José de Minas Provincia de Pichincha*.
- Burciaga Dávila, H. C. (2001). *Comportamiento físico-químico durante el desarrollo del tubérculo de jícama*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Cadima, F. X. (2006). Tubérculos: Universidad Mayor de San Andrés, La Paz (Bolivia).
- Cobeña, R. G., Cañarte, B. E., Mendoza, G. A., Cárdenas, G. F. M., & Guzmán, C. Á. (2017). Manual técnico del cultivo de camote.
- Coimbra, J. S., Gabas, A. L., Minim, L. A., Rojas, E. E. G., Telis, V. R., & Telis-Romero, J. (2006). Density, heat capacity and thermal conductivity of liquid egg products. *Journal of Food Engineering*, 74(2), 186-190.
- Conrado, K., & Acurio, L. (2018). *Determinación de propiedades térmicas de oca (Oxalis tuberosa), jícama (Smallanthus sonchifolius), mashua (Tropaeolum tuberosum) y camote (Ipomoea batatas)*. (Grado - Ingeniero en Alimentos), Universidad Técnica de Ambato, Ambato.
- Coultate, T. P. (2007). *Manual de química y bioquímica de los alimentos*: Editorial Acribia.
- Choi, Y., & Okos, M. R. (1986). Effects of temperature and composition on the thermal properties of food. *Food engineering and process applications*, 93-101.
- Devaux, A., Ordinola, M. E., Hibon, A., & Flores, F. A. (2010). *El sector papa en la región andina: Diagnóstico y elementos para una visión estratégica (Bolivia, Ecuador y Perú)*: International Potato Center.
- Dickerson, R. (1965). An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. *Food Technology*, 19(5), 198-204.

- Emshwiller, E. (2002). Biogeography of the *Oxalis tuberosa* alliance. *The Botanical Review*, 68(1), 128.
- Espín, C. C. I. (2013). *Aporte al rescate de la mashua aplicando técnicas de cocina de vanguardia*.
- Farinu, A., & Baik, O.-D. (2007). Thermal properties of sweet potato with its moisture content and temperature. *International Journal of Food Properties*, 10(4), 703-719.
- Fellows, P. J. (2009). *Food processing technology: principles and practice*: Elsevier.
- Flores, H. R., & Valdez, S. K. (2006). Determinaciones termogravimétricas y de calor específico de un concentrado comercial de ulexita, entre temperatura ambiente y 1.000 °C. *Revista de metalurgia*, 42(6), 404-408.
- Gabas, A. L., Marra-Júnior, W., Telis-Romero, J., & Telis, V. (2005). Changes of density, thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat of plums during drying. *International Journal of Food Properties*, 8(2), 233-242.
- García, V. E. (2010). Determinación de la difusividad térmica en pulpa de noni (*Morinda citrifolia*, L), en función de la temperatura.
- Garea, B., Curbelo, A., Artiles, J., & Cedenho, L. (1991). Determinación de la conductividad y la difusividad térmica del meollo de la caña de azúcar. *Tecnología, Ciencia y Educación Ediciones Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos*, 7, 20-24.
- Giraldo-Gómez, G. I., Gabas, A. L., Telis, V. R. N., & Telis-Romero, J. (2010). Propiedades termofísicas del jugo concentrado de lulo a temperaturas por encima del punto de congelación. *Food Science and Technology*, 30, 90-95.
- Guerrero, J. L. G. (2015). La biodiversidad de los alimentos ecuatorianos: fuente de salud y riqueza potencial. *ECUADOR ES CALIDAD: Revista Científica Ecuatoriana*, 2(2).
- Huamán Castilla, N. L., Yupanqui, G., Allcca, E., & Allcca, G. (2016). Efecto del contenido de humedad y temperatura sobre la difusividad térmica en granos andino. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 82(3), 259-271.

- Hwang, M. P., & Hayakawa, K. I. (1979). A specific heat calorimeter for foods. *Journal of food science*, 44(2), 435-448.
- Ibarz, A., & Ribas, A. I. (2005). *Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos*: Mundi-Prensa Libros.
- Jara, R. (2012). Determinación de la conductividad térmica de la pulpa del yacón (*Smallanthus sonchifolius*) en función de la humedad y la temperatura.
- Karel, M., Fennema, O. R., & Lund, D. B. (1975). *Principles of food science. Part II. Physical principles of food preservation*: Marcel Dekker, Inc.
- Lewis, M. J. (1993). *Propiedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado*: Acribia.
- Lind, I. (1991). The measurement and prediction of thermal properties of food during freezing and thawing—a review with particular reference to meat and dough. *Journal of Food Engineering*, 13(4), 285-319.
- Lozano, J. E., Urbicain, M. J., & Rotstein, E. (1979). Thermal conductivity of apples as a function of moisture content. *Journal of food science*, 44(1), 198-199.
- Ly, J. (2009). *Boniatos o camotes (Ipomoea batatas Lam) para alimentar cerdos: características de la composición química y de los factores antinutricionales*: Instituto de Investigaciones Porcinas.
- Martínez-Bustos, F., Amaya-Llano, S. L., Carbajal-Arteaga, J. A., Chang, Y. K., & Zazueta-Morales, J. d. J. (2007). Physicochemical properties of cassava, potato and jicama starches oxidised with organic acids. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87(7), 1207-1214.
- Mohsenin, N. N. (1980). *Thermal properties of foods and agricultural materials*. New York, USA.
- Mora, A., & Morera, J. (1995). Investigación en jícama (*Pachyrhizus erosus*) y su potencial para el desarrollo agrícola de la Región. *Agronomía Mesoamericana*, 01-06.

- Morón, C. (1999). Importancia de los cultivos andinos en la seguridad alimentaria y nutrición. *Memorias de la Reunión Técnica y Taller de Formulación de Proyecto Regional sobre Producción y Nutrición Humana en Base a Cultivos Andinos*. FAO. Centro Internacional de la Papa. Universidad Nacional del Altiplano. Universidad Nacional de San Agustín. Lima [Perú], 31-53.
- Muñoz, J. C. (2002). *Determinación de la difusividad térmica en pasta de murta (Ugni molinae Turcz) en función de la temperatura*. Tesis Ingeniero en Alimentos. Valdivia, Chile. Universidad Austral, Facultad
- Murakami, E., & Okos, M. (1989). Measurement and prediction of thermal properties of foods *Food properties and computer-aided engineering of food processing systems* (pp. 3-48): Springer.
- National Research Council. (1989). *Lost crops of the Incas: little-known plants of the Andes with promise for worldwide cultivation*: National Academies Press.
- Nieto, C., Muñoz, E., & Rivera, M. (1987). El cultivo de camote (Ipomoea batatas) en Ecuador su estado actual y perspectivas.
- Peleg, M., & Bagley, E. B. (1983). *Physical properties of foods*. Paper presented at the IFT basic symposium series (USA).
- Rahman, S. (1995). *Food Properties Handbook* CRC Press Inc Boca Raton: Florida.
- Rahman, S. (2009). *Food properties handbook*: CRC press.
- Rahman, S., & Potluri, P. (1991). Thermal conductivity of fresh and dried squid meat by line source thermal conductivity probe. *Journal of food science*, 56(2), 582-583.
- Ramaswamy, H. S., & Marcotte, M. (2005). *Food processing: principles and applications*: CRC Press.
- Rao, M. A., & Anantheswaran, R. C. (1988). Convective heat transfer to fluid foods in cans *Advances in food research* (Vol. 32, pp. 39-84): Elsevier.
- Ríos, T. (1996). Concepción de un dispositivo para medir la conductividad térmica.

- Rodas, M. (2019). Determinación de las propiedades termofísicas (conductividad y difusividad térmica) en cinco variedades de papas nativas (*solanum tuberosum*).
- Rolfe, E. (1968). The chilling end freezing of foods. In "Biochemical and Biological Engineering Science," Vol. 2.(Ed.) N. Blakebrough: Academic Press, New York.
- Rubiano, K., Cárdenas, J., & Ciro Velásquez, H. J. (2015). Evaluación de las propiedades termodinámicas y térmicas del d-limoneno encapsulado mediante secado por aspersión.
- Sakiyama, T., Akutsu, M., Miyawaki, O., & Yano, T. (1999). Effective thermal diffusivity of food gels impregnated with air bubbles. *Journal of Food Engineering*, 39(3), 323-328.
- Salvadori, V. O. (1994). *Transferencia de calor durante la congelación, el almacenamiento y la descongelación de alimentos*. Facultad de Ingeniería.
- Singh, R. P., & Heldman, D. R. C. (2009). *Introducción a la ingeniería de los alimentos*: Editorial Acribia.
- Sulla Huamán, R. I. (2016). Influencia de los sólidos solubles en el calor específico de la pulpa concentrada de piña (*Ananas comosus*), zumo concentrado de naranja (*Citrus sinensis*) y comparación con los modelos matemáticos de Choi y Okos, Siebel y Heldman.
- Suquilanda, M. (1984). Cultivos asociados en el Ecuador: una experiencia. IV Congreso Internacional de Cultivos Andinos. *Centro Regional de Investigaciones, Obonuco, Pasto, ICA, Co*, 79-80.
- Sweat, V., & Haugh, C. (1974). A thermal conductivity probe for small food samples. *Transactions of the ASAE*, 17(1), 56-0058.
- Tavman, I., & Tavman, S. (1999). Measurement of thermal conductivity of dairy products. *Journal of Food Engineering*, 41(2), 109-114.

- Telis-Romero, J., Telis, V., Gabas, A., & Yamashita, F. (1998). Thermophysical properties of Brazilian orange juice as affected by temperature and water content. *Journal of Food Engineering*, 38(1), 27-40.
- Tovilla, A. (2015). Transporte de masa y calor durante el secado convectivo de tubérculos (*Solanum tuberosum*) considerando su deformación.
- Turrell, F., & Perry, R. (1957). *Specific heat and heat conductivity of citrus fruit*. Paper presented at the Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.
- Unklesbay, N., Unklesbay, K., Hsieh, F., & Sandik, K. (1992). Thermophysical properties of extruded beef/corn flour blends. *Journal of food science*, 57(6), 1282-1284.
- Villacrés, E., Quelal, M. B., & Álvarez, J. (2013). Nutrición, procesamiento y gastronomía de raíces y tubérculos andinos en Ecuador: Una revisión bibliográfica de papa, melloco, oca, mashua, zanahoria blanca y jícama.
- Villacrés, E., Quelal, M. B., & Álvarez, J. (2016). *Redescubriendo la oca y la mashua: Desarrollo de nuevos snacks*: Valencia, ES: Académica Española, 2016.
- Wang, N., & Brennan, J. (1992). Thermal conductivity of potato as a function of moisture content. *Journal of Food Engineering*, 17(2), 153-160.
- Zambrano Del Pino, E. A., & Yupanqui Vargas, C. V. (2016). Diseño y construcción de un equipo para la determinación de la conductividad térmica de alimentos sólidos mediante el Método de Fitch modificado.
- Ziegler, E. E. (1997). *Conocimientos actuales sobre nutrición*: Pan American Health Org.

ANEXOS

ANEXO A. RESULTADOS BIBLIOGRÁFICOS

A.1. Valores bibliográficos determinados por las ecuaciones de Choi y Okos (1986)

Tabla 9. Calor específico determinado mediante las ecuaciones propuestas por Choi y Okos (1986) para tubérculos enteros

Componentes	Calor específico (kJ/kg°C)				
	C_{pi}	Mashua	Oca	Jícama	Camote
C_p agua	4.1761	3.65	3.5121	3.6165	2.9191
C_p carbohidratos	1.5787	0.1547	0.21	0.1894	0.4152
C_p proteínas	2.0272	0.0304	0.0203	0.0061	0.0345
C_p grasa	2.0065	0.014	0.012	0.006	0.008
C_p ceniza	1.1219	0.0067	0.0112	0.0034	0.0112
C_p fibra	1.8154	0.0163	0.0182	0.0091	0.0127
C_p final (kJ/kg°C)		3.8722	3.7838	3.8305	3.4007

Tabla 10. Calor específico determinado mediante las ecuaciones propuestas por Choi y Okos (1986) para los extractos de tubérculos

Componentes	Calor específico (kJ/kg°C)				
	C_{pi}	Mashua	Oca	Jícama	Camote
C_p agua	4.1758	3.8401	3,681	3.8121	3.06
C_p carbohidratos	1.5641	0.097	0.1602	0.1362	0.3801
C_p proteínas	2.0178	0.0129	0.0135	0.0013	0.0153
C_p grasa	1.9957	0.009	0.0096	0.0012	0.0072
C_p ceniza	1.1075	0.0037	0.0013	0.0003	0.0044
C_p fibra	1.831	0.0077	0.0062	0.0008	0.0165
C_p final (kJ/kg°C)		3.9703	3.8718	3.9519	3.4836

Tabla 11. Difusividad térmica determinada mediante las ecuaciones propuestas por Choi y Okos (1986) para tubérculos enteros

Componentes	Difusividad térmica (m ² /s)				
	α_i	Mashua	Oca	Jícama	Camote
α agua	1.60×10^{-7}	1.40×10^{-7}	1.35×10^{-7}	1.39×10^{-7}	1.12×10^{-7}
α carbohidratos	1.04×10^{-7}	1.02×10^{-7}	1.39×10^{-8}	1.25×10^{-8}	2.74×10^{-8}
α proteínas	9.20×10^{-8}	1.38×10^{-9}	9.20×10^{-10}	2.76×10^{-10}	1.56×10^{-9}
α grasa	1.06×10^{-7}	7.43×10^{-10}	6.37×10^{-10}	3.19×10^{-10}	4.25×10^{-10}
α ceniza	1.43×10^{-7}	8.56×10^{-10}	1.43×10^{-9}	4.28×10^{-10}	1.43×10^{-9}
α fibra	9.71×10^{-8}	8.74×10^{-10}	9.71×10^{-10}	4.86×10^{-10}	6.80×10^{-10}
	α_{final} (m²/s)	1.54×10^{-7}	1.53×10^{-7}	1.53×10^{-7}	1.44×10^{-7}

Tabla 12. Difusividad térmica determinada mediante las ecuaciones propuestas por Choi y Okos (1986) para los extractos de tubérculos

Componentes	Difusividad térmica (m ² /s)				
	α_i	Mashua	Oca	Jícama	Camote
α agua	1.51×10^{-7}	1.38×10^{-7}	1.33×10^{-7}	1.37×10^{-7}	1.1×10^{-7}
α carbohidratos	9.66×10^{-8}	5.99×10^{-9}	9.89×10^{-9}	8.41×10^{-9}	2.35×10^{-8}
α proteínas	8.36×10^{-8}	5.35×10^{-10}	5.60×10^{-10}	5.18×10^{-11}	6.35×10^{-10}
α grasa	1.03×10^{-7}	4.64×10^{-10}	4.95×10^{-10}	6.19×10^{-11}	3.71×10^{-10}
α ceniza	1.36×10^{-7}	4.49×10^{-10}	1.63×10^{-10}	3.13×10^{-11}	5.45×10^{-10}
α fibra	8.94×10^{-8}	3.76×10^{-10}	3.04×10^{-10}	4.02×10^{-11}	8.05×10^{-10}
	α_{final} (m²/s)	1.46×10^{-7}	1.44×10^{-7}	1.46×10^{-7}	1.36×10^{-7}

Tabla 13. Conductividad térmica determinada mediante las ecuaciones propuestas por Choi y Okos (1986) para tubérculos enteros

Componentes	Conductividad térmica (W/m°C)				
	k_i	Mashua	Oca	Jícama	Camote
k_{agua}	0.6172	0.5598	0.5464	0.5617	0.4835
$k_{\text{carbohidratos}}$	0.2386	0.0152	0.0209	0.0188	0.0440
$k_{\text{proteínas}}$	0.2117	0.0025	0.0017	0.0005	0.0031
k_{grasa}	0.262	0.0021	0.0018	0.0009	0.0013
k_{ceniza}	0.3684	0.0009	0.0016	0.0005	0.0017
k_{fibra}	0.2174	0.0016	0.0017	0,0000	0.0018
k_{final} (W/m°C)		0.5821	0.5741	0.5824	0.5354

Tabla 14. Conductividad térmica determinada mediante las ecuaciones propuestas por Choi y Okos (1986) para los extractos de tubérculos

Componentes	Conductividad térmica (W/m°C)				
	k_i	Mashua	Oca	Jícama	Camote
k_{agua}	0.6184	0.5902	0.5739	0.5827	0.5079
$k_{\text{carbohidratos}}$	0.2396	0.0096	0.0161	0.0135	0.0408
$k_{\text{proteínas}}$	0.2126	0.0011	0.0011	0.0001	0.0014
k_{grasa}	0.2645	0.0013	0.0015	0.0002	0.0012
k_{ceniza}	0.3695	0.0005	0.0002	0.0000	0.0007
k_{fibra}	0.2184	0.0007	0.0006	0.0000	0.0017
k_{final} (W/m°C)		0.6035	0.5934	0.5965	0.5536

ANEXO B. ANOVA-ANÁLISIS ESTADÍSTICO

B.1. Análisis estadístico de calor específico

Tabla 15. Análisis de varianza para calor específico

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Forma de determinación	0.4663	1	0.4663	28.38	0.00
B: Temperatura	3.7938	3	1.2646	76.95	0.00
C: Tipo de tubérculo	1.404	3	0.4680	28.48	0.00
INTERACCIONES					
AB	0.1386	3	0.0462	2.81	0.04
AC	0.1731	3	0.0577	3.51	0.02
BC	0.6359	9	0.0707	4.3	0.00
RESIDUOS	1.6598	101	0.0164		
TOTAL (CORREGIDO)	8.67	123			

Tabla 16. Prueba de múltiples rangos para calor específico por tipo de tubérculo

Tipo de tubérculo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos homogéneos
Camote	30	3.1882	0.0239	X
Mashua	33	3.3271	0.0233	X
Oca	29	3.3293	0.0243	X
Jícama	32	3.4971	0.0235	X

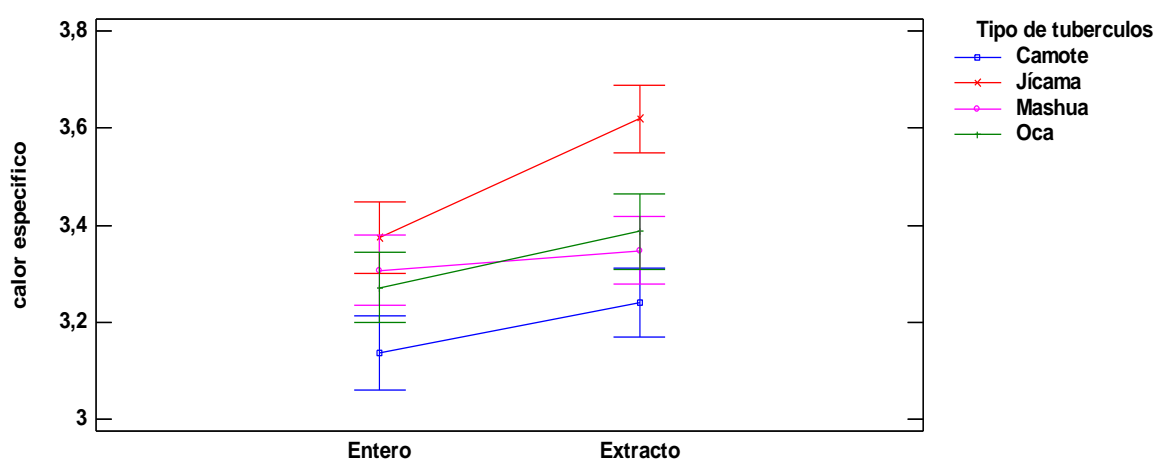


Figura 4. Interacción doble de tipo de tubérculo y forma de determinación para calor específico

Tabla 17. Prueba de múltiples rangos para calor específico por forma de determinación

Forma de determinación	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos homogéneos
Entero	61	3.2721	0.0169	X
Extracto	63	3.3987	0.0167	X

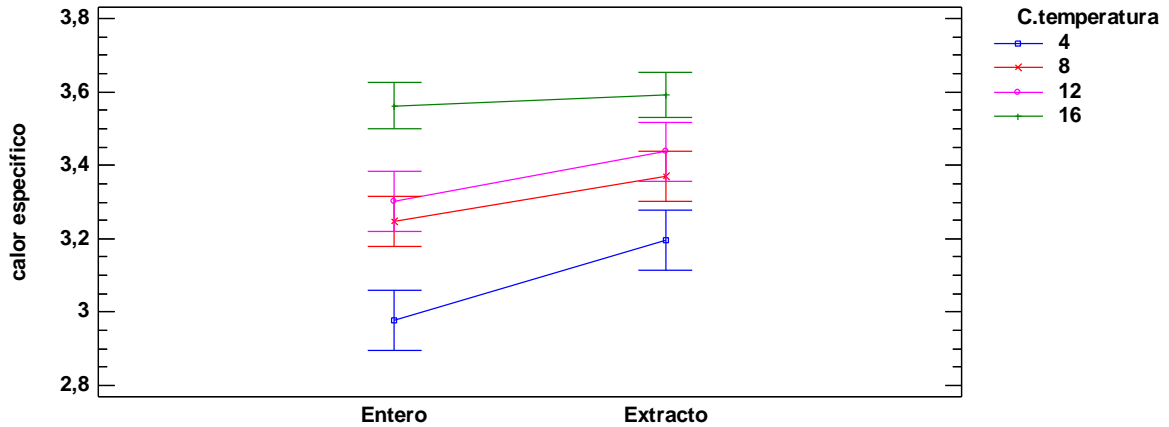


Figura 5. Interacción doble de forma de determinación y temperatura para calor específico

Tabla 18. Prueba de múltiples rangos para calor específico por temperatura

Temperatura	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
4	24	3.0864	0.0262	X
8	35	3.3086	0.0218	X
12	24	3.3693	0.0262	X
16	41	3.5775	0.0202	X

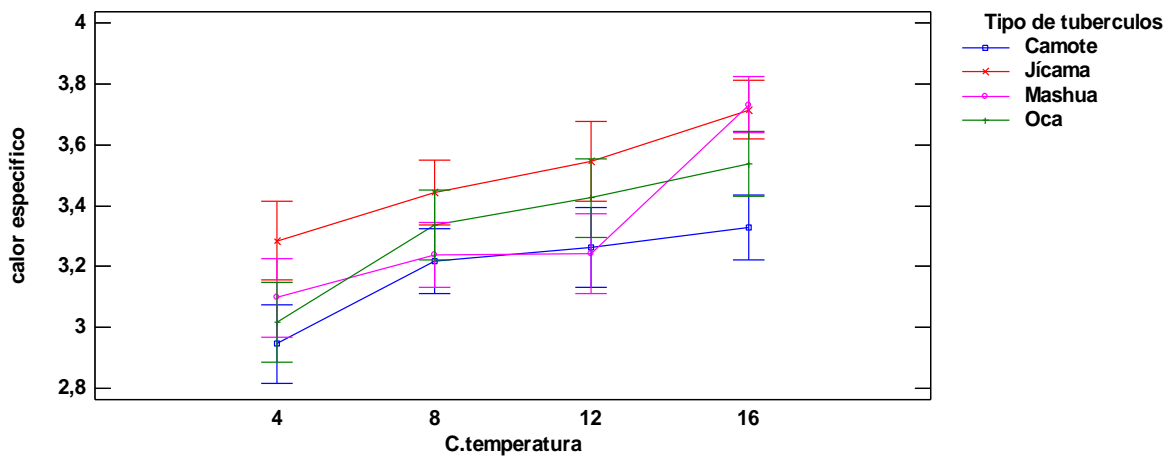


Figura 6. Interacción doble entre la temperatura y tipo de tubérculo para calor específico

B.2. Análisis estadístico de difusividad térmica

Tabla 19. Análisis de varianza para difusividad térmica

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Forma de determinación	2.068×10^{-7}	1	2.068×10^{-7}	269.38	0.00
B: Temperatura	0.6826×10^{-7}	3	0.2275×10^{-7}	29.61	0.00
C: Tipos de tubérculo	2.8091×10^{-7}	3	0.9364×10^{-7}	122.79	0.00
INTERACCIONES					
AB	0.0675×10^{-7}	3	0.0225×10^{-7}	2.99	0.0343
AC	0.517×10^{-7}	3	0.1723×10^{-7}	22.61	0.00
BC	0.1737×10^{-7}	9	0.0193×10^{-7}	2.61	0.009
RESIDUOS	0.851×10^{-7}	111	0.0077×10^{-7}		
TOTAL (CORREGIDO)	7.8341×10^{-7}	133			

Tabla 20. Prueba de múltiples rangos para difusividad térmica por tipo de tubérculo

Tipo de tubérculo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos homogéneos
Camote	30	1.0304×10^{-7}	1.6545×10^{-9}	X
Mashua	33	1.2428×10^{-7}	1.5731×10^{-9}	X
Oca	29	1.3788×10^{-7}	1.5442×10^{-9}	X
Jícama	32	1.4319×10^{-7}	1.5687×10^{-9}	X

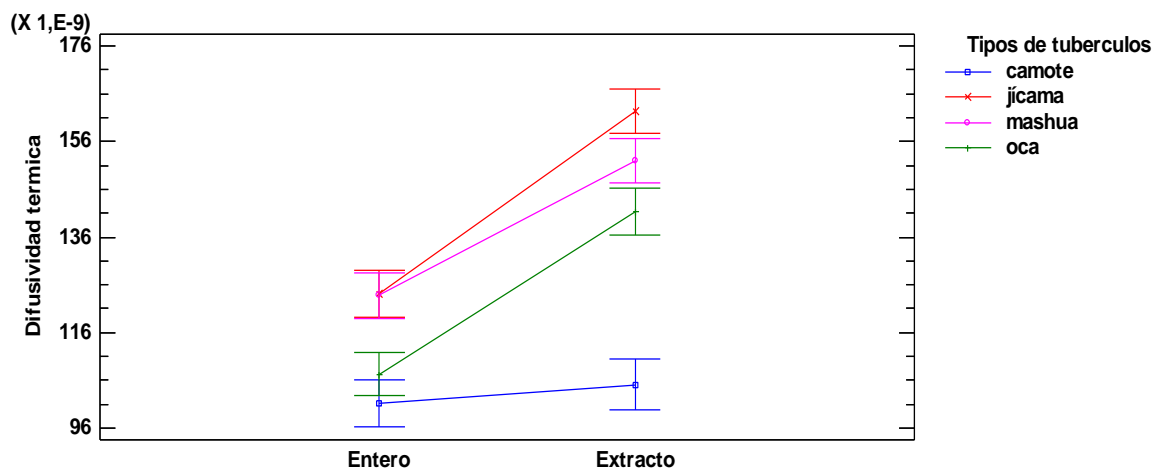


Figura 7. Interacción doble de tipo de tubérculo y forma de determinación para la difusividad térmica

Tabla 21. Prueba de múltiples rangos para difusividad térmica por forma de determinación

Forma de determinación	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos homogéneos
Entero	68	1.14×10^{-7}	1.1158×10^{-9}	X
Extracto	66	1.4×10^{-7}	1.1287×10^{-9}	X

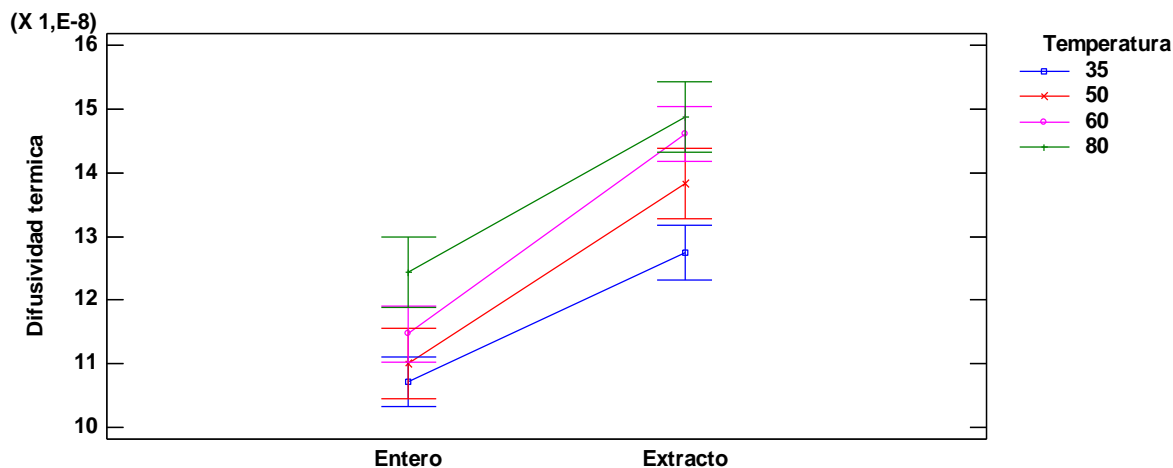


Figura 8. Interacción doble de forma de determinación y temperatura para difusividad térmica

Tabla 22. Prueba de múltiples rangos para difusividad térmica por temperatura

Temperatura	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos homogéneos
35	45	1.1733×10^{-7}	1.3256×10^{-9}	X
50	24	1.2415×10^{-7}	1.7809×10^{-9}	X
60	41	1.3037×10^{-7}	1.391×10^{-9}	X
80	24	1.3654×10^{-7}	1.7809×10^{-9}	X

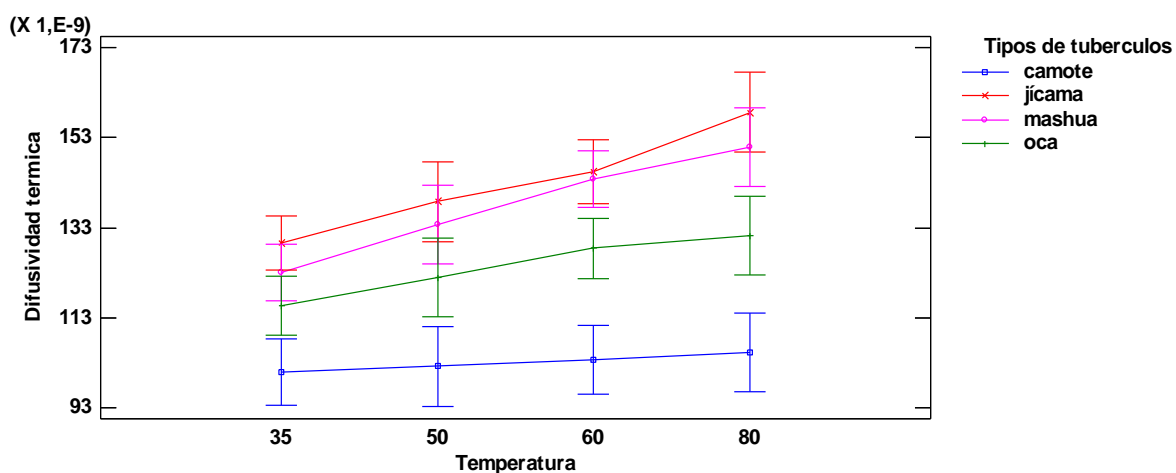


Figura 9. Interacción doble de temperatura y tipo de tubérculo para difusividad térmica

B.3. Análisis estadístico de conductividad térmica

Tabla 23. Análisis de varianza para conductividad térmica

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Forma de determinación	0.0027	1	0.0027	6.46	0.013
B: Voltaje	0.0153	2	0.0076	18.26	0.00
C: Tipo de tubérculo	0.0573	3	0.0191	45.71	0.00
INTERACCIONES					
AB	0.0002	2	0.0001	0.18	0.838
AC	0.0004	3	0.0001	0.29	0.829
BC	0.0043	6	0.0007	1.73	0.126
RESIDUOS	0.0309	74	0.0004		
TOTAL (CORREGIDO)	0.108	91			

Tabla 24. Prueba de múltiples rangos para conductividad térmica por tipo de tubérculos

Tipo de tubérculo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos homogéneos
Camote	21	0.5426	0.0046	X
Oca	23	0.5739	0.0044	X
Jícama	28	0.6007	0.0039	X
Mashua	20	0.6096	0.0046	X

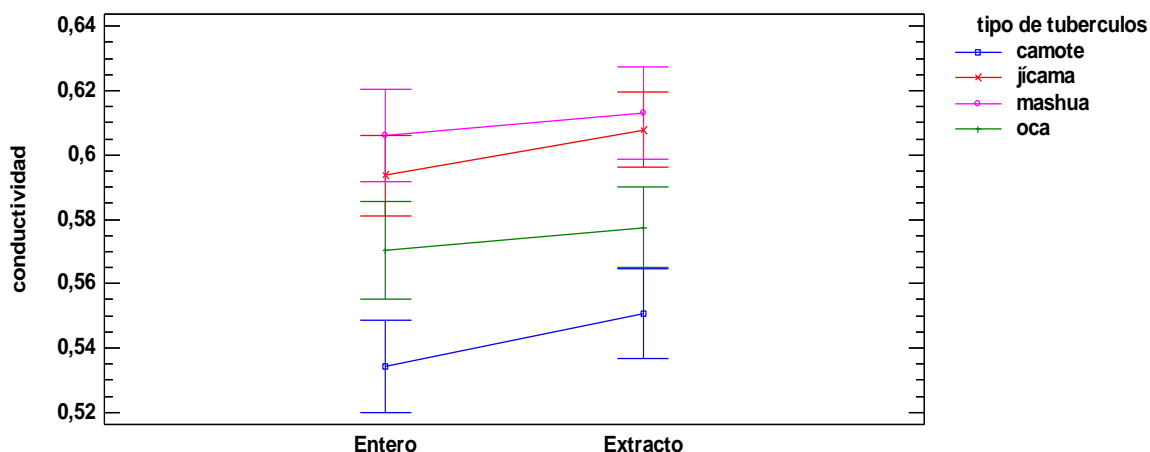


Figura 10. Interacción doble de tipo de tubérculo y forma de determinación para conductividad térmica

Tabla 25. Prueba de múltiples rangos para conductividad térmica por forma de determinación

Forma de determinación	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos homogéneos
Entero	42	0.5761	0.0032	X
Extracto	50	0.5873	0.003	X

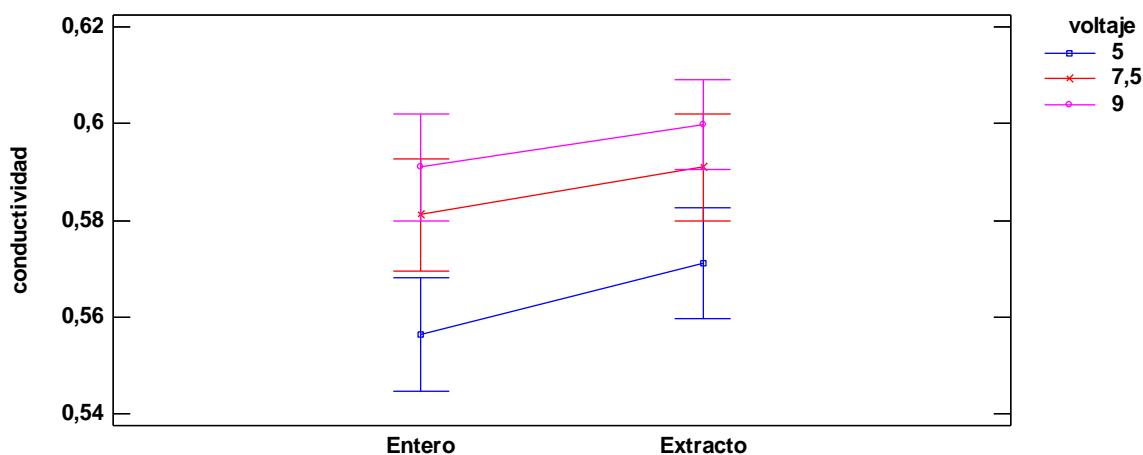


Figura 11. Interacción doble de forma de determinación y poder de calentamiento para conductividad térmica

Tabla 26. Prueba de múltiples rangos para conductividad térmica por voltaje

Voltaje	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos homogéneos
5	27	0.5637	0.004	X
7,5	29	0.586	0.0039	X
9	36	0.5954	0.0035	X

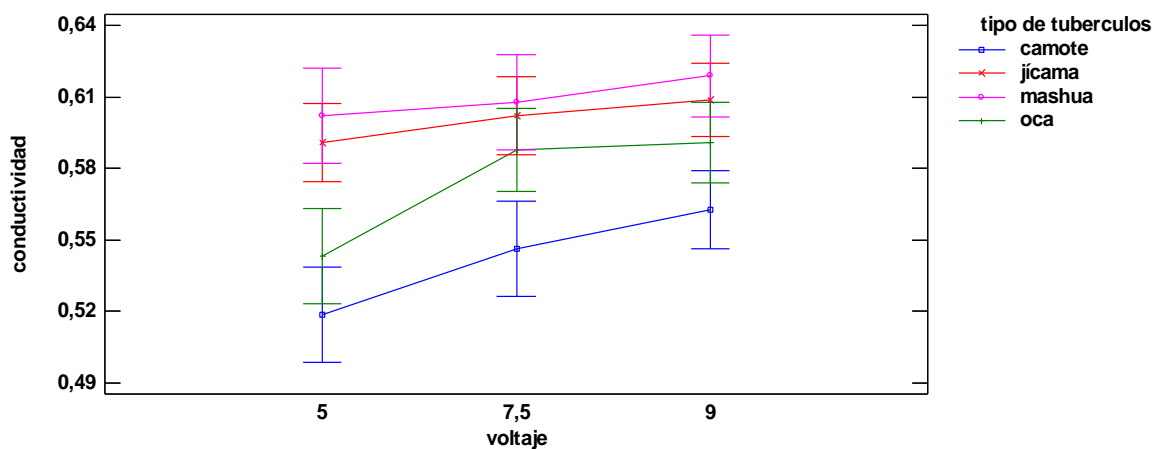


Figura 12. Interacción doble de poder de calentamiento y tipo de tubérculo para conductividad térmica

ANEXO C. IMÁGENES

C.1. Tubérculos



Imagen 1. Camote (*Ipomoea batatas*)



Imagen 2. Jícama (*Smallanthus sonchifolius*)



Imagen 3. Mashua (*Tropaeolum tuberosum*)



Imagen 4. Oca (*Oxalis tuberosa*)

C.2. Equipos y materiales



Imagen 9. Calorímetros (calor específico)



Imagen 10. Cilindros de acero (difusividad térmica)



Imagen 11. Método de sonda (conductividad térmica)



Imagen 11. Balanza de humedad