



FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS

**Determinación del comportamiento térmico de la zanahoria
blanca (*Arracacia xanthorrhiza*) y su almidón aplicando
Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN ALIMENTOS

Autor:

Lenin Omar Vele Punin

Director:

Dr. Piercosimo Tripaldi

Cuenca - Ecuador

2019

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado principalmente a Dios por las bendiciones recibidas durante mi proceso de formación. Además, a mis padres por formar el pilar que me hace posible lograr esta meta. Este logro es de los tres.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por guiarme, cuidarme y darme fortaleza en todos los momentos de mi vida y por nunca haberme dejado solo.

A mi Padre por su esfuerzo y sacrificio que me hacen posible cumplir esta meta, y también por todo su apoyo constante y consejos que tuvieron fin de motivarme y animarme.

A mi madre por su apoyo incondicional y dirección en todo este tiempo, y por confiar en el desarrollo de mis objetivos.

A mi director del trabajo de titulación, Dr Piercósimo Tripaldi por brindarme su orientación, conocimiento y paciencia durante el grado y el desarrollo de este trabajo.

A Ma. Elisa, de manera sincera, por estar a mi lado en los buenos y malos momentos, siempre dispuesta a motivarme y ayudarme. Gracias por hacer esta etapa de mi vida una de las mejores, pues sin ti hubiera sido más difícil conseguir este objetivo.

A la Universidad del Azuay, a toda su directiva y profesores, por formar parte de mi proceso de formación.

Determinación del comportamiento térmico de la zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza*) y su almidón aplicando calorimetría diferencial de barrido (DSC)

RESUMEN

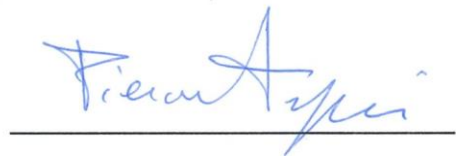
La *Arracacia xanthorrhiza* es un tubérculo de la gamma andina que en la última década ha atraído a la industria por sus cualidades, pese a esto no se le ha realizado una investigación a profundidad. Por lo que, este trabajo realizó un estudio a las propiedades térmicas, la cristalinidad, la viscosidad y el secado del tubérculo y su almidón. Se observó una correlación entre los resultados que indican una alta competitividad del almidón, destacando su elevado requerimiento energético y cristalinidad, que otorgan mayor resistencia a altas temperaturas y una viscosidad más estable, propicio para utilizarse en alimentos con estas características.

Palabras Clave: cristalinidad, deshidratado, viscosidad, análisis bromatológico, granulometría.



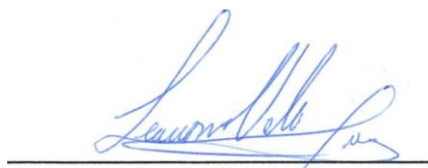
Ing. María Fernanda Rosales M.

Coordinadora de Escuela
Ingeniería en alimentos



Dr. Piercosimo Tripaldi

Director del trabajo de graduación



Sr. Lenin Omar Vele Punin

Autor

**Determination of the thermal behavior of the white carrot (*Arracacia xanthorrhiza*)
and its starch applying differential scanning calorimetry (DSC)**

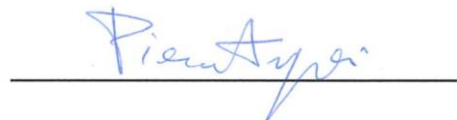
ABSTRACT

Arracacia xanthorrhiza is a tuber of the Andean gamma that has attracted the industry in the last decade for its qualities. Despite this, no thorough research has been conducted. This work carried out a study of the thermal properties, crystallinity, viscosity and drying of this tuber and its starch. A correlation was observed between the results that indicate a high competitiveness of starch, highlighting its high energy requirement and crystallinity. These provide greater resistance to high temperatures and a more stable viscosity, suitable for use in foods with these characteristics.

Keywords: crystallinity, dehydrated, viscosity, bromatological analysis, granulometry.



Ing. María Fernanda Rosales M.
Food Engineering
Faculty Coordinator




Dr. Piercosimo Tripaldi
Thesis Director



Sr. Lenin Omar Vele Punin

Author



Translated by
Ing. Paúl Arpi

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	ii
RESUMEN	¡Error! Marcador no definido.
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	viii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: MATERIALES Y MÉTODOS	15
1.1 Lugar investigación	15
1.2 Obtención del almidón de la zanahoria blanca	15
1.3 Análisis Bromatológicos	15
1.3.1 Humedad	15
1.3.2 Cenizas	15
1.3.3 Grasa.....	15
1.3.4 Fibra	16
1.3.5 Proteína.....	16
1.3.6 Valor energético	16
1.4 Granulometría del almidón de zanahoria blanca (AZB).....	16
1.5 Calor específico y Gelatinización por Calorimetría Diferencial de Barrido	16
1.6 Calor de combustión	16
1.7 Porcentaje de Cristalinidad	17
1.8 Viscosidad	17
1.9 Coeficiente de difusión y Curvas de secado de la zanahoria blanca.	17
1.10 Análisis estadístico descriptivo.	17
CAPÍTULO 2: RESULTADOS.....	18
2.2 Granulometría del AZB.	18
2.3 Entalpía y temperatura de Gelatinización.	19
2.4 Calor de Combustión	19
2.5 Calor específico (c)	20
2.6 Porcentaje de cristalinidad del almidón	21
2.7 Viscosidad	21

2.8 Aplicación de la ley de Fick para determinar el coeficiente de difusión en el secado de zanahoria blanca.....	23
CAPÍTULO 3: DISCUSIONES.....	25
CONCLUSIONES	299
BIBLIOGRAFÍA	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Características morfológicas de una planta de Arracacia xanthorrhiza	2
Figura 2. Formas Hortícolas (FH) de zanahoria blanca identificadas en la colección del Banco de Germoplasma de INIAP. A. FH morada. B. FH blanca y C. FH amarilla	3
Figura 3. Ejemplo de región cristalina de una muestra de almidón modificado. RSI: espectro del almidón. HCP: pico holocristalino con arreglo gaussiano.....	5
Figura 4. Curva medida por un DSC con el paso de la línea de base (cambio de Cp) y el pico endotérmico (transición de primer orden)	7
Figura 5. Esquema de la bomba calorimétrica: 1agitador eléctrico, 2 mini reactor (bomba), 3 camisa aislante, contenedor del agua, 4 balde adiabático, 5 termómetro diferencial, 6 cable de ignición y 7 tapa	8
Figura 6. Absorción, transmisión y reflexión de la radiación electromagnética al interactuar con la materia	9
Figura 7. Frecuencias de vibraciones en el rango infrarrojo de entre 400 y 4000 cm ⁻¹	10
Figura 8. Esquema del FT-IR	11
Figura 9. Ley de Newton de la viscosidad	12
Figura 10. Curva de fluidez para representar la viscosidad dinámica y aparente	12
Figura 11. Flujo de Couette en un viscosímetro de cilindros concéntricos.....	13
Figura 12. Distribución granulométrica del almidón de zanahoria blanca	18
Figura 13. Termograma de gelatinización de una muestra de ZBC Y AZB.....	19
Figura 14. Curva de aumento de temperatura de una muestra de AZB.....	20
Figura 15. Aumento del c y su ecuación en el rango de 303.15 a 333.15°K.....	20
Figura 16. Región de cristalinidad de una muestra de AZB	21
Figura 17. Comportamiento de la viscosidad del AZB en un rango de temperatura de 20°C a 60°C.(τ) esfuerzo de cizalla, (γ) velocidad de cizallamiento	22
Figura 18. Velocidad de cizalla (γ) vs viscosidad (η)	22
Figura 19. Análisis de componentes principales para el comportamiento de la viscosidad del AZB	23
Figura 20. Curva de secado zanahoria blanca rodajas de 3 mm de espesor	23
Figura 21. Curva de secado zanahoria blanca rodajas de 6 mm de espesor	24

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición bromatológica de <i>Arracacia xanthorrhiza</i>	3
Tabla 2. Longitud de onda para distintos rangos en el infrarrojo.	10
Tabla 3. Composición bromatológica de la zanahoria blanca.	18
Tabla 4. Temperaturas (°C) y entalpía ΔH (J/g) de gelatinización del AZB y ZBC.	19
Tabla 5. Coeficientes de difusión de masa para las muestras analizadas de zanahoria blanca.	24
Tabla 6. Temperaturas (°C) y entalpía ΔH (J/g) de los almidones de papa, maíz, olluco y zanahoria blanca.	26
Tabla 7. Valor energético de almidón de maíz, yuca zanahoria blanca, papa y camote.	26
Tabla 8. Calor específico de almidón de zanahoria blanca, maíz y trigo.	27
Tabla 9. Porcentaje de cristalinidad de almidón de papa, maíz, zanahoria blanca y taro. ...	27

Vele Punin Lenin Omar

Trabajo de titulación

Dr. Piercósimo Tripaldi

Octubre, 2019

**DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA ZANAHORIA BLANCA
(*ARRACACIA XANTHORRIZA*) Y SU ALMIDÓN APLICANDO CALORIMETRÍA
DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC).**

INTRODUCCIÓN

La región andina goza de gran diversidad de alimentos en toda su extensión, que desde la antigüedad hasta el presente han constituido la alimentación de sus pobladores, y además participan importantemente en el mercado internacional. Los tubérculos son los más destacables de estos alimentos, por su productividad, variedad y calidad nutricional. Uno de los tubérculos de esta gamma es la *Arracacia xanthorrhiza* una raíz tuberosa de la familia *Apiaceae* del género *Arracacia*, conocida como zanahoria blanca, arracacha, r'acacha, laquchu, rakkacha o virracacha a lo largo de los Andes. Esta especie fue domesticada desde tiempos antiguos y es considerada una raíz inca por ser nativa andina (Palacios, Morales, & Gladys, 2011).

La información actual acerca de este tubérculo ha llamado la atención de los consumidores y de la industria, puesto que aspectos como su contenido de almidón, minerales y vitaminas son destacables. Además, el almidón contiene una cantidad de hasta el 20% de amilosa lo cual permite que sea de fácil digestión, por ende, es recomendado para ancianos, niños y personas en convalecencia. Otra ventaja del almidón y los productos elaborados a partir de este, es que permite un almacenamiento por largos tiempos y a temperaturas relativamente bajas, pues el contenido reducido de amilosa permite que la retrogradación se minimice (Cobo, Quiroz, & Santacruz, 2013). Estas características mencionadas reflejan un gran potencial del tubérculo, ya sea en estado fresco, en harina o en almidón. Sin embargo, el estudio de la zanahoria blanca no ha sido profundizado, siendo necesario para que la industria la tome más en cuenta, ya que estos análisis destacarán sosteniblemente las cualidades del tubérculo y su almidón para la elaboración de productos nuevos, mejorar ya existentes o como sustituto.

Las propiedades térmicas, físico-químicas y funcionales son indispensables para el desarrollo industrial. Por lo que la mayoría de tubérculos tienen desarrollados los análisis de estas propiedades, enfocados principalmente en su almidón. No obstante, la zanahoria blanca, según la bibliografía actual, no ha recibido estos análisis por completo. En respuesta a esta problemática, el presente estudio tuvo como objetivo analizar: la propiedad estructural,

porcentaje de cristalinidad; las propiedades térmicas, entalpía de gelatinización, calor específico y calor de combustión; la propiedad funcional, viscosidad, y la propiedad de secado, coeficiente de difusión másica. Estos estudios aportan nueva información de la zanahoria blanca que contribuyen para seguir desarrollando bibliografía de este producto que proyecta gran potencial.



Figura 1. Características morfológicas de una planta de *Arracacia xanthorrhiza*

Fuente: (Parra Fuentes, 2018)

Los requerimientos del suelo para su producción son reducidos y presenta fácil adaptabilidad a distintas zonas geológicas, porque es nombrada como la única umbelífera domesticada en la región (Carrero et al., 2018). Aunque, muestra mayor rendimiento en alturas de entre 1700 y 2500 metros sobre el nivel del mar (Palacios et al., 2011). Su consumo y producción es principalmente en Perú, Colombia y Ecuador.

Existen tres formas hortícolas o variedades principales identificadas del tubérculo, estas son: blanca, amarilla y morada, indicadas en la Figura 2. La variedad blanca es la más producida y comercializada por su alto rendimiento, se caracteriza por ser de color blanco claro y de ser relativamente delicada en su producción. La variedad amarilla se caracteriza por tener más tronco y ser de bajo rendimiento en raíz, su producción está dirigida a autoconsumo y alimentación de animales, además requiere mínimo cuidado fitosanitario por ser altamente resistente. La variedad morada presenta una coloración especial en sus hojas y en el tubérculo que caracteriza su nombre, su rendimiento es bajo, debido a esto su producción es reducida (Barrera et al., 2004). En las provincias de la sierra ecuatoriana se han identificado 17 morfo-tipos a partir de estas tres formas hortícolas principales (Mazón Ortiz et al., 1996).



Figura 2. Formas Hortícolas (FH) de zanahoria blanca identificadas en la colección del Banco de Germoplasma de INIAP. A. FH morada. B. FH blanca y C. FH amarilla

Fuente: (Barrera et al., 2004)

La producción del tubérculo en el Ecuador presenta una mediana extensión de aproximadamente 10 ha y la principal zona productora está en Pichincha en San José de minas. En décadas anteriores su producción se redujo considerablemente ya que fue reemplazada por la producción lechera y de otros tubérculos que significaban mayor rentabilidad. No obstante, su producción ha retomado importancia en la actualidad, aunque no se ha explotado totalmente, y es gracias a que se conoce de mejor forma al producto en cuanto a propiedades nutricionales y físico-químicas mediante investigaciones realizadas, en la Tabla 1 se muestra la composición bromatológica del tubérculo en sus tres variedades (Villacrés, Quelal, & Alvarez, 2013).

Tabla 1. Composición bromatológica de *Arracacia xanthorrhiza*

	Variedades					
	Amarilla		Blanca		Morada	
	Fresca	Seca	Fresca	Seca	Fresca	Seca
	g %					
Sólidos Totales	28.66	100.00	26.37	100.00	26.14	100.00
Agua	71.34	0.00	73.63	0.00	73.86	0.00
Proteína total *	0.76	2.65	0.61	2.34	0.55	2.10
Extracto etéreo	0.28	0.98	0.24	0.91	0.24	0.92
Ceniza	0.67	2.34	0.74	2.81	0.59	2.26
Carbohidratos	26.95	86.90	24.78	86.67	24.76	86.91
Fibra Cruda	0.95	3.31	0.89	3.38	0.85	3.25
Azúcares Reductores totales	1.02	3.56	0.70	2.65	1.03	3.94
Almidón	21.51	75.05	20.20	76.60	19.81	75.78
pH	6.20	-	6.30	-	6.30	-
Vitamina C (**)	24.78	86.46	26.46	100.34	19.80	75.75
Valor calórico (***)	113.06	365.78	103.57	363.40	103.32	363.79

* Factor de proteína = 6.25 ** Valor expresado en mg% *** Valor expresado en kilocalorías

Fuente: (Palacios et al., 2011)

El Almidón

El almidón es la mayor reserva de carbohidratos en los vegetales y posee gran versatilidad de uso en diferentes aplicaciones. Su composición es a partir de homopolímeros de glucopiranososa con diferentes estructuras: la amilosa, polímero de cadena lineal compuesta por D-glucosa unidas por enlaces α -D (1-4) y la amilopectina, polímero ramificado, contiene cadenas cortas de D-glucosa unidas por enlaces α -D-(1-6) a la cadena principal (Carballo Cuevas, 2017).

Cristalinidad de los almidones

A nivel molecular el almidón está constituido por gránulos con un sistema polimérico semicristalino, esta característica es atribuida a las dobles hélices formadas por las cadenas cortas lineales de la amilopectina organizadas en una estructura cristalina tridimensional. El tipo de cristalinidad se divide en tres tipos según su origen: tipo A (cereales), tipo B (raíces) y tipo C (leguminosas) (Dávila, 2014).

El porcentaje de cristalinidad en los almidones resulta importante a nivel comercial, pues influye sobre la resistencia mecánica, la flexibilidad, y el almacenamiento de alimentos elaborados a partir de almidón. A su vez el grado de cristalinidad dependerá del origen del almidón y la relación de amilosa y amilopectina, existiendo la proporcionalidad de a mayor amilopectina mayor grado de cristalinidad. Tal es el caso del maíz céreo que casi no presenta amilosa y es altamente cristalino, en cambio, los almidones de variedades amiláceas llegan a presentar entre el 50% y el 70% de amilosa (Dávila, 2014).

La determinación del grado de cristalinidad se realiza principalmente por: difracción de rayos X, calorimetría diferencial de barrido, y giro con ángulo mágico y polarización cruzada C en resonancia magnética nuclear; XRD, DSC y MAS-C CP NMR respectivamente, por sus siglas en inglés. Sin embargo, estos demandan de costo alto de análisis por lo que no es muy conveniente, incluso el método por DSC resulta impreciso y complicado debido a que las mediciones se realizan a diferentes estados. Ventajosamente se ha desarrollado un método más accesible y tan confiable como el XRD, este se basa en la espectroscopía infrarroja por transformadas de Fourier, FT-IR por sus siglas en inglés, en donde se interpone el espectro de la muestra sobre su curva de arreglo gaussiano, entonces su relación es el grado de cristalinidad, esto se ejemplifica en la Figura 3 (Sun et al., 2014).

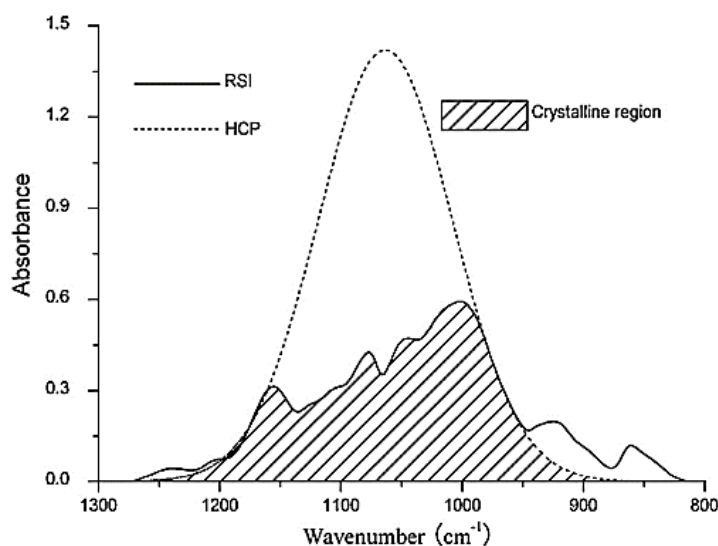


Figura 3. Ejemplo de región cristalina de una muestra de almidón modificado. RSI: espectro del almidón. HCP: pico holocristalino con arreglo gaussiano

Fuente: (Sun et al., 2014)

Gelatinización

Es la pérdida de cristalinidad de los gránulos de almidón en presencia de calor y humedad, en este proceso se pierde el orden molecular de manera gradual e irreversiblemente. La gelatinización se logra explicar debido a que el agua penetra inicialmente en las regiones amorfas ocasionando el hinchamiento del gránulo que se relaciona a la pérdida de la birrefringencia. Posteriormente, el agua se esparce de las cadenas de almidón a la superficie de los cristales a medida que la temperatura crece, provocando la movilidad térmica de las moléculas y por ende su solvatación. Todo esto finalmente provoca que las dobles hélices se desplieguen hasta que la estructura granular queda fragmentada casi completamente, adquiriendo el almidón una textura solución-gel (Dávila, 2014).

La determinación de este estado se realiza principalmente por DSC, siendo su medición muy precisa y sencilla. Generalmente en los termogramas son los primeros picos altos en aparecer, lo que hace fácil su reconocimiento e interpretación (Höhne, Hemminger, & Flammershein, 2003).

Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

Es un método que permite analizar térmicamente a un material, el equipo que trabaja bajo este método se denomina Calorímetro DSC y se basa en observar y cuantificar las diferentes transiciones energéticas que puede presentar un cuerpo, tales como cristalización, fusión y evaporación, ya sea por calentamiento o enfriamiento, con o sin cambio de fase o por reacciones químicas como hidrólisis y oxidación (Suriñach et al., 1992).

Esta técnica permite que las reacciones en calor y los caudales de calor, se midan rápidamente en pequeñas masas (miligramos) y en amplios rangos de temperatura,

permitiendo así una medición de alta precisión. DSC se aplican en los siguientes campos (Höhne, Hemminger, & Flammersheim, 2003):

- Caracterización de materiales
- Investigaciones de estabilidad
- Evaluación de diagramas de fases
- Investigación cinética
- Investigación de seguridad
- Determinación de capacidad calórica y capacidad de calor complejo
- Mediciones comparativas (control de calidad, identificación de sustancias o mezclas)

DSC fundamento teórico

La medición de las propiedades térmicas se basa en una diferenciación del flujo de calor que se desarrolla entre una muestra y una referencia de características conocidas a temperatura constante programada, entonces, la cantidad de calor diferente de la referencia será el flujo de calor que se desea determinar de la muestra en diferentes fases, ya sea producido por absorción (endotérmica) o liberación (exotérmica) del calor (Höhne, Hemminger, & Flammersheim, 2003).

El intercambio definido del calor que debe medirse con el entorno tiene lugar a través de una conducción de calor bien definida con una resistencia térmica dada, este calor programado puede ser constante o variable, dependiendo de los parámetros que se necesite aplicar, además una ventaja del principio de diferencia es que, en la primera aproximación, perturbaciones como las variaciones de temperaturas en el entorno del sistema de medición y similares, afectan a los dos sistemas de medición de la misma manera y se compensan cuando la diferencia entre las señales individuales es formada (Höhne, Hemminger, & Flammersheim, 2003).

Curvas DSC

Los equipos DSC hoy en día siempre están conectados con un sistema de adquisición de datos y una computadora, lo que permite presentar los datos medidos en un monitor en forma de curvas. Normalmente estas curvas vienen trazadas en términos de flujo (mW) de calor versus tiempo o temperatura, pero además es posible calcular otras cantidades a partir de los valores medidos originalmente y trazar los gráficos respectivos (Höhne, Hemminger, & Flammersheim, 2003).

La Curva DSC permite tener información rápida del proceso de medición total como: cambios de calor específico, transiciones y reacciones. Además, la curva permite ver:

- Si el rango de temperatura ha sido cubierto completamente.
- Si existieron alteraciones mecánicas o eléctricas del aparato.
- Si las temperaturas características y las áreas de los picos se encuentran dentro del rango esperado (Höhne, Hemminger, & Flammersheim, 2003).

A continuación, la Figura 4 enseña una curva DSC que ofrece información rápida sobre el proceso de medición total.

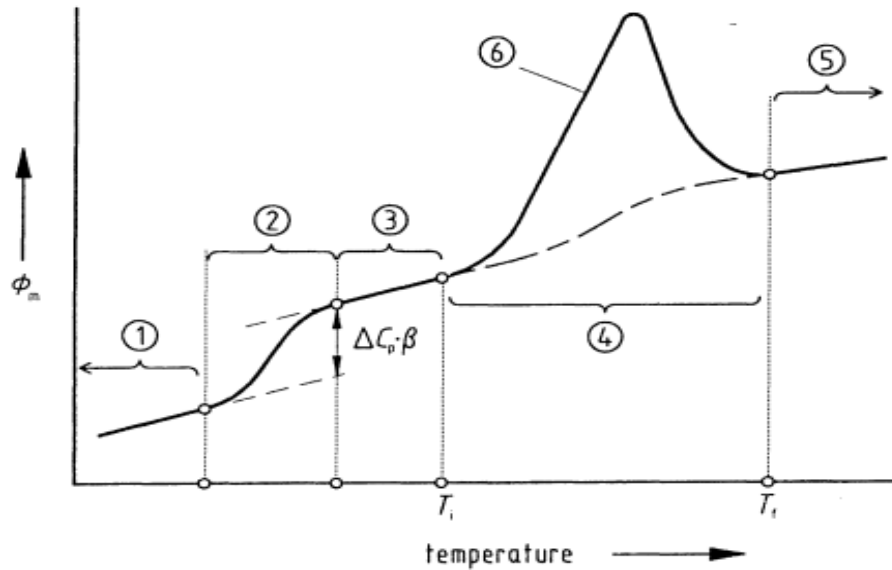


Figura 4. Curva medida por un DSC con el paso de la línea de base (cambio de Cp) y el pico endotérmico (transición de primer orden)

1. Segmento inicial de la curva medida, 2. Paso o escalonado de la curva medida debido a ΔC_p (cambio de la capacidad calorífica), 3. curva medida, 4. Línea de base interpolada en la región del pico generado entre T_i y T_f , 5. Segmento final de la curva medida, 6. Pico de la curva media.

Fuente: (Höhne, Hemminger, & Flammersheim, 2003)

Calor de Combustión

Es el contenido energético total de un material, este parámetro se determina al cuantificar la cantidad de calor desprendido durante su combustión total. Los hidratos de carbonos y lípidos en una combustión física total se oxidan completamente a CO_2 y H_2O , y finalmente se liberan totalmente en forma de calor. La combustión de las proteínas resulta en múltiples compuestos entre ellos la urea y amoníaco, que de igual manera al final se desprende como calor, sin embargo, esto no representa el metabolismo humano debido a que la urea y amoníaco se elimina por vía urinaria, por lo que para ser comparativo el calor liberado por metabolismo y por bomba calorimétrica se debería restar el calor liberado por la urea y amoníaco (Juliarena & Gratton, 2006).

La determinación del calor de combustión se realiza en una bomba calorimétrica que consiste en un sistema cerrado a presión constante en donde la muestra colocada en el mini reactor combustiona por fusión térmica eléctrica, el calor desprendido capta el agua que rodea la bomba aumentando su temperatura que es medido por un termómetro, este aumento de temperatura es utilizado para calcular el calor de combustión del material en análisis (Alvarez & Santa Cruz, 2017).

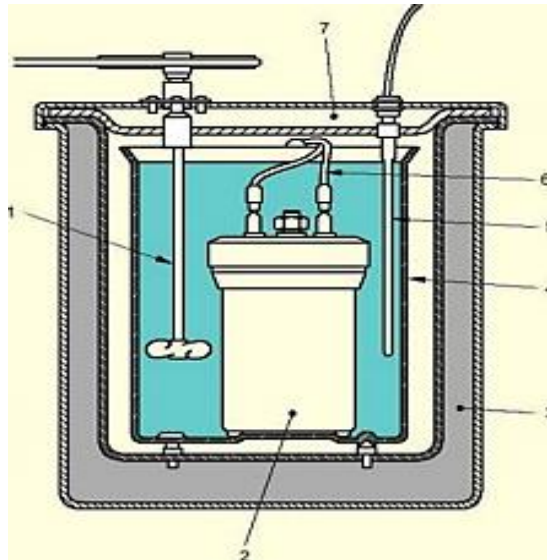


Figura 5. Esquema de la bomba calorimétrica: 1 agitador eléctrico, 2 mini reactor (bomba), 3 camisa aislante, contenedor del agua, 4 balde adiabático, 5 termómetro diferencial, 6 cable de ignición y 7 tapa

Fuente: (Alvarez & Santa Cruz, 2017)

Este valor es de elevada importancia en los alimentos, pues indica la cantidad energética que el cuerpo obtendrá al consumir cierto tipo de alimento, dependiendo de su digestibilidad, el valor es normalmente publicado en las etiquetas del alimento para informar al consumidor y prever su decisión por temas de dieta o salud (Juliarena & Gratton, 2006).

Calor específico (c)

Este parámetro determina la cantidad de energía en forma de calor que se necesita para cambiar la temperatura de un material en una unidad, en los alimentos depende totalmente de su composición. La ecuación utilizada para esta determinación está en función de la cantidad de calor aplicado, de la masa del alimento, y las temperaturas de sometimiento, la ecuación característica se muestra a continuación (Orrego Alzate, 2003).

$$c = \frac{q}{m\Delta T}$$

donde,

q es el calor ganado o perdido en Julios o Kilojulios (KJ)

m es la masa (Kg)

ΔT es el cambio en la temperatura (°C ó °K)

c es el calor específico (KJ/Kg °C) ó (J/Kg °C). Cuando se utiliza c_p , el subíndice p significa a presión constante. En la práctica, sólo cuando se trabaja con gases es necesario distinguir entre el calor específico a presión constante y el calor específico a volumen constante c_v .

En alimentos esta propiedad se puede determinar por varios métodos como: el de calentamiento a temperatura constante y utilizando cartas de distribución de temperatura, y a partir de otros parámetros como la conductividad y la difusividad térmica. Pero los más comunes son: el método de mezclas, el método modificado de mezclas y el método por DSC (Moraga, 2008). Este último se ha convertido en los de mayor uso por su facilidad y confiabilidad, pues la determinación se realiza a partir de los termogramas del alimento y una referencia de c ya conocido, el cálculo realizado para determinar este valor corresponde a la siguiente ecuación (Joline, 1981).

$$cs = \frac{H}{h} * \frac{mr}{ms} * cr$$

donde,

cs c de la muestra

cr c de la referencia

ms peso de la muestra

mr peso de la referencia

H diferencia de muestra y bandeja vacía (valor DSC)

h diferencia de la referencia y bandeja vacía (valor DSC)

Espectroscopía Infrarroja

La espectroscopía infrarroja, IR por sus siglas en inglés, estudia la absorción, transmisión y reflexión de energía radiante originada por la interacción entre la radiación y las moléculas de la muestra en estudio. Se basa en que la molécula, al absorber la radiación infrarroja, cambia su estado de energía vibracional y rotacional. La incidencia de la intensidad de la luz en la muestra se indica en la Figura 6, donde la intensidad de la luz transmitida a través de la muestra (P_T) es menor que la intensidad incidente (P_0), una parte de esta intensidad incidente se refleja (P_R), mientras que otra parte ha sido absorbida por la sustancia (P_A) (Macho Aparicio, 2002).

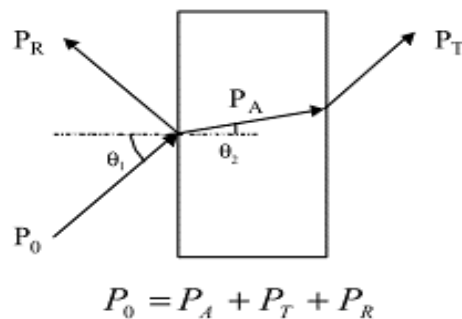


Figura 6. Absorción, transmisión y reflexión de la radiación electromagnética al interactuar con la materia

Fuente: (Macho Aparicio, 2002)

Las transiciones rotacionales requieren de muy poca energía por lo que es observable específicamente para gases. En cambio, los cambios entre estados de energía vibracional se producen en muestras sólidas y líquidas. Cada compuesto tiene un comportamiento particular frente a un haz de infrarrojo dentro de un rango determinado, en la Tabla 2 se indican los distintos rangos del espectro infrarrojo (Piqué & Vázquez, 2012).

Tabla 2. Longitud de onda para distintos rangos en el infrarrojo

Infrarrojo	cm ⁻¹
Lejano	10 a 650
Medio	650 a 4000
Próximo	4000 a 12500

Fuente: (Piqué & Vázquez, 2012)

De los rangos del espectro el de más utilidad en moléculas orgánicas es el medio y en parte el lejano, pues en este caso la banda de absorción se asocia únicamente a un grupo funcional y a la estructura molecular completa. Las vibraciones derivan de grupos que contienen hidrógeno (C-H, O-H, y N-H) o grupos con dobles y triples enlaces aislados. El rango entre 400 y 1300 cm⁻¹ que ocupa parte del lejano y medio, es denominado región de la huella digital o fingerprint, esta es una zona de espectro muy útil para la identificación de compuestos específicos. En la Figura 7 se muestra las frecuencias de absorción de los grupos funcionales más comunes en el rango de IR medio (Macho Aparicio, 2002).

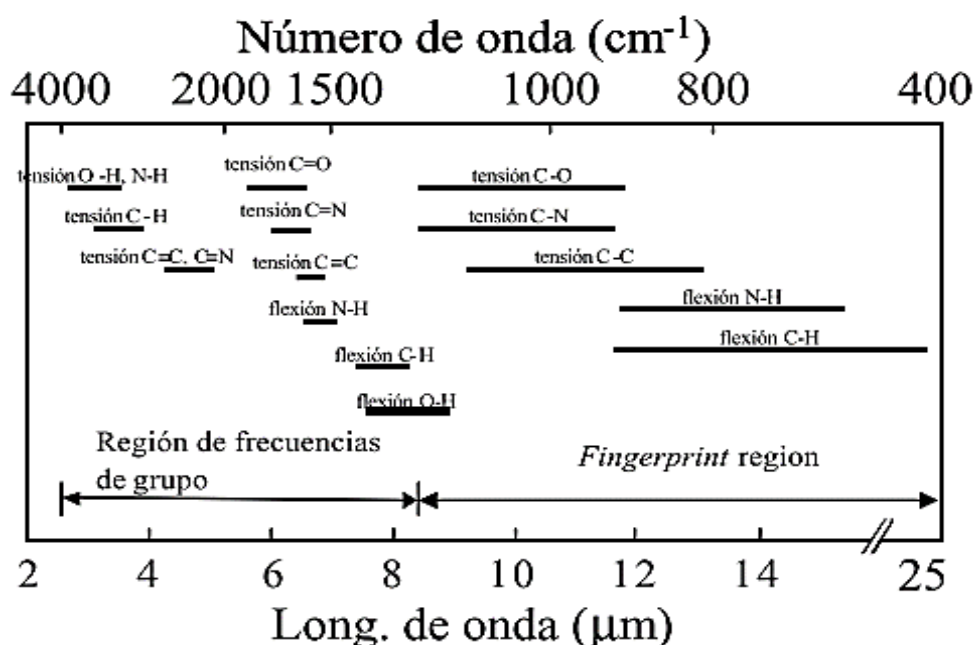


Figura 7. Frecuencias de vibraciones en el rango infrarrojo de entre 400 y 4000 cm⁻¹

Fuente: (Macho Aparicio, 2002)

La espectroscopía Infrarroja por transformadas de Fourier (FT-IR), es una técnica que permite una mejor relación señal-ruido, y mayor rapidez en la obtención de espectros que la ofrecida por espectrofotómetros convencionales, además ofrece alta resolución, gran sensibilidad, precisión y exactitud incomparable. La FT-IR ofrece espectros obtenidos a partir de interferogramas, mediante un detector que aplica tratamiento matemático para convertir la señal óptica en una señal eléctrica fácilmente medible, este proceso permite recoger información simultánea acerca de la respuesta de la muestra a todas las frecuencias en el rango de estudio, facilitando la interpretación de los resultados (Serrano Martínez, n.d.). En la Figura 8 se esquematiza la FT-IR (Serrano Martínez, n.d.).



Figura 8. Esquema del FT-IR

Fuente: (Serrano Martínez, n.d.)

Viscosidad

Es una medida de la resistencia de un fluido a ser deformado por un esfuerzo de cizallamiento, en los líquidos esta resistencia se produce ante el flujo. También se puede definir como la resistencia interna de un fluido a circular o fluir. Este concepto de viscosidad nació con Newton que finalmente planteó la siguiente ecuación que es base para entender las curvas de fluidez (BYK-Gardner, 2013; Juan Sebastián, 2006).

$$\tau = \mu * \gamma$$

donde,

τ es el esfuerzo de cizalla o esfuerzo por unidad de área.

γ es la velocidad de cizalla o gradiente de velocidad.

μ es la viscosidad.

Dependiendo del comportamiento del fluido, la viscosidad será constante o no, esta característica denominará a los fluidos como newtonianos (constante) y no newtonianos (no constante) (BYK-Gardner, 2013).

Los fluidos newtonianos y no newtonianos se representa en la Figura 9, en los primeros la pendiente tiende a ser constante y solo depende de la temperatura y la presión para la formación de las rectas, mantiene una relación proporcional entre la fuerza de cizallamiento y la velocidad de deformación (BYK-Gardner, 2013). En los fluidos no newtonianos la viscosidad varía con el tiempo cuando se le aplica un esfuerzo cortante, por lo que no se puede conseguir un valor de viscosidad específico (Carrillo Parra, 2016).

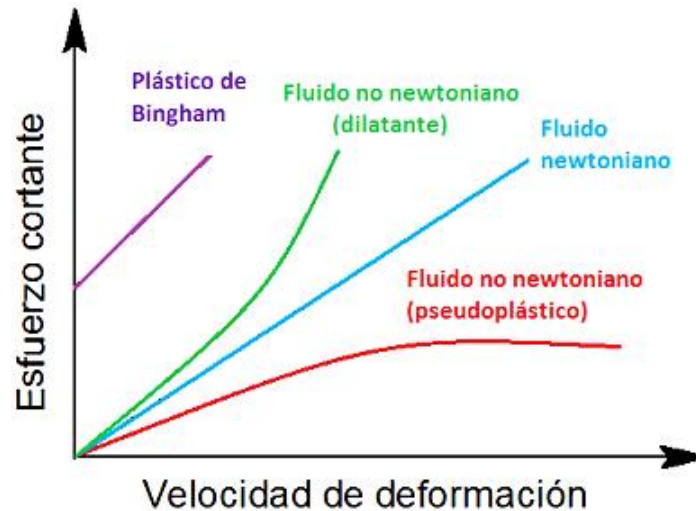


Figura 9. Ley de Newton de la viscosidad

Fuente:(Carrillo Parra, 2016)

Tipos de viscosidad

Viscosidad Dinámica o Absoluta, representada como μ . En una curva de fluidez se define como la pendiente en cada punto de dicha curva. Viscosidad Aparente, representada como " η " es el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. Generalmente utilizado para denominar la viscosidad en fluidos no newtonianos (Juan Sebastián, 2006).

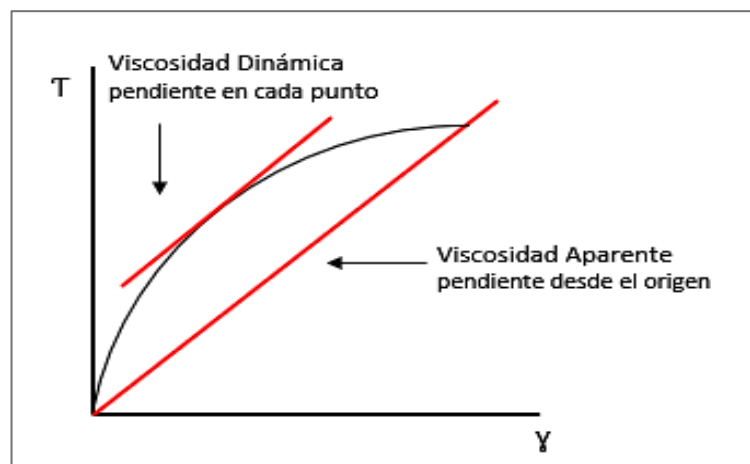


Figura 10. Curva de fluidez para representar la viscosidad dinámica y aparente

Fuente: (Juan Sebastián, 2006)

Viscosímetros

Para determinar la viscosidad, los instrumentos más ampliamente usados son: viscosímetros de cilindros concéntricos, de cono placa, de placas paralelas y capilares. El viscosímetro más usado de los anteriores por su fácil manejabilidad, es el de cilindros concéntricos. La estructura de este viscosímetro consiste en dos cilindros concéntricos sobrepuestos uno hueco (externo) y otro macizo (interno), representado en la Figura 11. Su funcionamiento se

basa en girar uno de los cilindros para generar cizalla en el fluido situado en el espacio anular entre los cilindros (García Quesada, 2008).

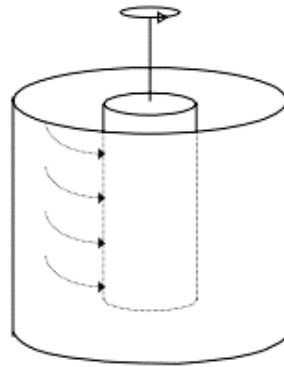


Figura 11. Flujo de Couette en un viscosímetro de cilindros concéntricos

Fuente: (García Quesada, 2008)

Coefficiente de difusividad en el proceso de secado.

El secado es un proceso desarrollado en la antigüedad y que actualmente es uno de los más utilizados en la conservación de alimentos. Se basa en la eliminación del agua o humedad de un producto alimenticio, ya sea por sometimiento natural o artificial. Esto otorga al alimento ventajas como mayor vida útil, fácil conservación, almacenamiento, etc. (Alvarado, 2016).

Durante el proceso de secado ocurren fenómenos complejos donde intervienen varios mecanismos de transferencia de calor y materia, estos dos parámetros son indispensables para entender el proceso de secado, lo cual permite su control y mejora. La transferencia de calor es la base del secado, este puede ocurrir por convección, conducción o radiación, desde el ambiente o la fuente de calor hasta el interior del alimento. Como resultado se tiene la transferencia de masa, siendo esta masa el agua a secar, que ocurre en dos etapas, la primera desde el interior del alimento hasta la superficie del mismo mediante diferentes mecanismos como difusión de vapor, difusión de líquido y capilaridad. La segunda etapa ocurre desde la superficie del producto hasta el ambiente por convección másica y difusión (Alvarado, 2016).

La ley de Fick estudia a la difusión másica como un movimiento macroscópico de las moléculas de un sistema debido a un gradiente de concentración. Esta ley es base para la determinación del coeficiente de difusividad másica en procesos donde se efectúa la transferencia de masa como en el secado. Este valor depende de la temperatura, presión y composición del sistema (Alvarado, 2016).

Análisis de Componentes Principales

Este método tiene como objetivo transformar un conjunto de variables en otras denominadas componentes principales, estos nuevos valores tienen como característica estar correlacionadas entre sí. Su aplicabilidad se basa en que es un método de reducción que

permite disminuir la dimensión del número de variables originales que se toman en cuenta en un análisis. Esto se logra al realizar una combinación lineal de las variables originales para formar un sistema de coordenadas ortogonales, que ordena automáticamente las componentes principales según la varianza de la proyección de datos lo que permite eliminar fácilmente componentes con menor varianza (de la Fuente Fernández, 2011).

Las ventajas principales del análisis son: garantizar la mínima pérdida de información y otorgar fácil interpretación, gracias a que las componentes obtenidas son ortogonales entre sí (Gómez Verdejo, 2012).

La metodología de este proceso tiene base matemática en el álgebra lineal, en donde inicialmente se dispone de una matriz lineal formada por las variables de entrada y el número de observaciones para posteriormente tener una matriz de variables de salida y observaciones donde la cantidad de variables de salida será menor que los de entrada (Gómez Verdejo, 2012). Actualmente para desarrollar este análisis existen distintos softwares como Minitab o R, que son prácticos de usar y permiten fácil interpretación de los resultados a partir de sus gráficas.

CAPÍTULO 1

MATERIALES Y MÉTODOS

1.1 Lugar investigación

El trabajo experimental se llevó a cabo en el laboratorio de Análisis de Química Instrumental de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad del Azuay, el cual cuenta con el personal, equipos y material de trabajo adecuados para el cumplimiento de los objetivos del presente proyecto.

1.2 Obtención del almidón de la zanahoria blanca

La zanahoria blanca, de forma hortícola blanca, utilizada como materia prima, tuvo procedencia del sur del Ecuador, provincia Loja y se adquirió en el mercado El Arenal en Cuenca Ecuador. La extracción del almidón se realizó con el método de molienda húmeda según (Ortiz Alcocer et al., 2018) con leves modificaciones. Las raíces previamente seleccionadas fueron limpiadas, lavadas y pesadas, posterior se peló y cortó manualmente en cubos de aproximadamente de 1 cm x 1cm x 1cm, estos estuvieron en reposo por 40 minutos en agua en una proporción de 1:3 producto: agua. El producto fue triturado en una licuadora hasta conseguir completa desintegración. La porción triturada fue lavada tres veces por un tamiz con la misma agua de remojo. El material filtrado se dejó sedimentar en refrigeración por 3 horas, y el retenido fue desechado. Transcurrido el tiempo de sedimentación el sobrenadante fue eliminado, el sedimento se dejó reposar en refrigeración hasta el día siguiente. El almidón obtenido fue secado en una estufa a 40°C por 24 horas. El almidón ya seco se trituró en un mortero con pistilo, para nuevamente ser secado por 48 horas a 40°C hasta peso constante. Por último, se almacenó herméticamente hasta posterior uso.

1.3 Análisis Bromatológicos

Los análisis bromatológicos de la zanahoria blanca fueron realizados por triplicado para mayor nivel de confianza de los resultados.

1.3.1 Humedad

Se utilizó el método termogravimétrico de la AOAC *Official Method 934.01 Loss on Drying (Moisture) at 95 - 100°C for Feeds Dry Matter on Oven Drying at 95 - 100°C for Feeds* (AOAC, 2012), el método se llevó a cabo en una estufa marca Continental Equipment.

1.3.2 Cenizas

Se utilizó el método termogravimétrico de la AOAC *Official Method 942.05 Ash of Animal Feed* (AOAC, 2012). El equipo empleado para esta determinación fue la mufla marca Nabertherm.

1.3.3 Grasa

Se utilizó el método de extracción de grasa de la AOAC *Official Method 963.15, Determination of total fat in meat, fish, coca, and derived products* (VELP, 2006) (AOAC, 2012), se trabajó en un equipo modelo SER 148 de marca VELP Scientifica (VELP, 2006b), como solvente se usó éter de petróleo.

1.3.4 Fibra

Se utilizó el método químico gravimétrico de la AOAC *Official Method 978.10, Fiber (Crude) in Animal Feed and Pet Food* (AOAC, 2012), se trabajó en un equipo modelo *Raw Fiber Extractor* (FIWE) de marca VELP Scientifica (VELP, 2006); se aplicó el tratamiento de ácido y álcalis secuencial para obtener la fibra total mediante gravimetría.

1.3.5 Proteína

Se utilizó el método kjeldahl de la AOAC *Official Method 960.52, Microchemical determination of nitrogen- Micro-Kjeldahl method* (AOAC, 2012), se trabajó en un equipo modelo UDK 129 de marca VELP Scientifica (VELP, 2006).

1.3.6 Valor energético

La determinación del valor energético de la zanahoria blanca, fue realizada mediante el cálculo de energía según sus macromoléculas, tal como se indica en (Carbajal Azcona, 2013).

1.4 Granulometría del almidón de zanahoria blanca (AZB)

Se usó el conjunto de tamices ASTM E-11 STANDAR de marca W.S. TYLER con mesh desde 710 μm hasta 45 μm . Antes de realizar el tamizaje se pesó y rotuló cada tamiz del conjunto. El almidón ya obtenido se pesó y diluyó en una proporción aproximada de 1:1 almidón: agua. Se vertió la mezcla por los tamices y usando una brocha se removió la mezcla en el tamiz para evitar retenciones. Se dejó en reposo 2 horas para lograr mejor filtración. Se secaron los tamices en una estufa a 40°C hasta lograr peso constante. Finalmente se pesaron los tamices y se realizaron los cálculos respectivos.

1.5 Calor específico y Gelatinización por Calorimetría Diferencial de Barrido

Se utilizó el equipo DSC marca Bonnin Instrument Technology, Modelo 800B con una resolución de 0.01 μW . Las muestras empleadas para el proceso de gelatinización fueron zanahoria blanca cruda (ZBC) y una solución almidón:agua 1:1, y para el calor específico las muestras fueron AZB y corindón como referencia. La cantidad de muestra para el análisis fue aproximadamente 20 mg. Las muestras cargadas en las bandejas propias del equipo, se tapó y prensó adecuadamente quedando estas en estado hermético. El equipo se manejó según (BONNING INSTRUMENT TECHNOLOGY LTD, 2018), programado con las temperaturas de análisis correspondientes (T_{inicio} : 40°C, T_{final} : 300°C y tasa de 5°C/min) y los datos fueron guardados y analizados mediante el software DCS 500B Thermal Analysis Program. Se aplicó una corrección de temperatura a los datos obtenidos a partir de una calibración con indio. Para la determinación del c se realizó los cálculos según (Joline, 1981). Sobre los datos de gelatinización se utilizó el software MatLab para la determinación de las áreas de los picos en análisis, y finalmente se calculó las entalpías mediante una relación área-entalpía entre los datos obtenidos y de calibración con indio. Todos los análisis fueron realizados por triplicado.

1.6 Calor de combustión

El calor de combustión del AZB fue determinado por el método calorímetro bomba de oxígeno. El equipo usado fue el calorímetro bomba de oxígeno 1341 de PARR INSTRUMENT COMPANY. La metodología se aplicó según (PARR COMPANY INSTRUMENT, 2008). La

muestra empleada fue secada previamente a 100°C para obtenerla en base seca, se utilizó para el análisis aproximadamente 1g. Todos los análisis se realizaron por triplicado.

1.7 Porcentaje de Cristalinidad

El AZB fue secado previamente a 100°C hasta obtenerlo en base seca. Las muestras para la lectura en IR y los cálculos realizados para obtener el porcentaje de cristalinidad se llevaron a cabo según el método (Sun et al., 2014) con ligeras modificaciones. La muestra de análisis se obtuvo a partir de una mezcla de KBr y almidón (20 mg de almidón/3000mg de KBr), posteriormente mediante un sistema de prensado por tuercas se construyeron celdas cristalinas para la medición, para lograr celdas más uniformes se utilizó un tamiz 0.25 μm . La medición se realizó en el espectrofotómetro Nicolet IR100 con una resolución de 4 cm^{-1} en un rango espectral de 4000 – 400 cm^{-1} . El software OMNIC fue usado para realizar la corrección de línea base de los espectros IR de los almidones medidos, se especificó también el rango espectral de análisis (1300 - 800 cm^{-1}). El software OriginPro 8 fue utilizado para construir el arreglo gaussiano a las curvas experimentales. Todos los análisis fueron realizados en seis repeticiones.

1.8 Viscosidad

La viscosidad del almidón fue determinada por el método de viscosímetros concéntricos. Se utilizó el viscosímetro Fungilab modelo Evo Expert, equipado con el cilindro Splinder TR8. Se usó el software Fungilab Data Boss EVO versión 1.2.0 para la programación del equipo y la recolección e interpretación de los datos obtenidos. La muestra usada fue una dispersión de AZB al 2% en agua, que antes de usarse fue correctamente homogeneizada hasta evitar sedimentación. Se corrió el equipo en 5 temperaturas diferentes (20, 30, 40, 50 y 60°C), de igual manera las muestras se calentaron respectivamente a estas temperaturas en cada corrida. Finalmente se aplicó el análisis de componentes principales, mediante el software Minitab 18, sobre las pendientes de las curvas obtenidas para cada temperatura, que corresponde a los valores de viscosidad.

1.9 Coeficiente de difusión y Curvas de secado de la zanahoria blanca

El proceso de secado del tubérculo y los cálculos correspondientes se hizo según la metodología indicada por (Alvarado, 2016), con las siguientes modificaciones. Se utilizó una estufa eléctrica marca Continental Equipment, las temperaturas de secado fueron 40, 60 y 70°C. Las muestras de zanahoria blanca fueron rodajas y tuvieron un espesor de 3 y 6 mm. La pérdida de agua se controló por cada 30 minutos en una balanza analítica. Todo el proceso se realizó por triplicado para cada muestra.

1.10 Análisis estadístico descriptivo

Todos los análisis realizados fueron desarrollados por réplicas, por lo que se aplicó mediante Excel estadística descriptiva a los datos obtenidos, con el fin de representarlos correctamente.

CAPÍTULO 2

RESULTADOS

2.1 Análisis Bromatológicos

Los resultados de los análisis bromatológicos de la zanahoria blanca, de variedad blanca, se indican en la Tabla 3. Estos valores se expresan en estado fresco y seco.

Tabla 3. Composición bromatológica de la zanahoria blanca.

Zanahoria Blanca variedad blanca		
Componentes	Fresca	Seca
Sólidos totales (%)	26.90 ± 0.49	100
Agua (%)	73.09 ± 0.49	0
Proteína total (%) *	0.58 ± 0.09	2.24 ± 0.25
Extracto etéreo (%)	0.22 ± 0.01	0,85 ± 0.01
Ceniza (%)	0.87 ± 0.06	3.37 ± 0.01
Fibra (%)	0.91 ± 0.04	3.53 ± 0.01
Valor Calórico (Kcal)	105.23	390.77

* Factor de proteína= 6,25

2.2 Granulometría del AZB.

La distribución del AZB se expresó en porcentaje de retención según el mesh del tamiz correspondiente, que se representa en la Figura 12.

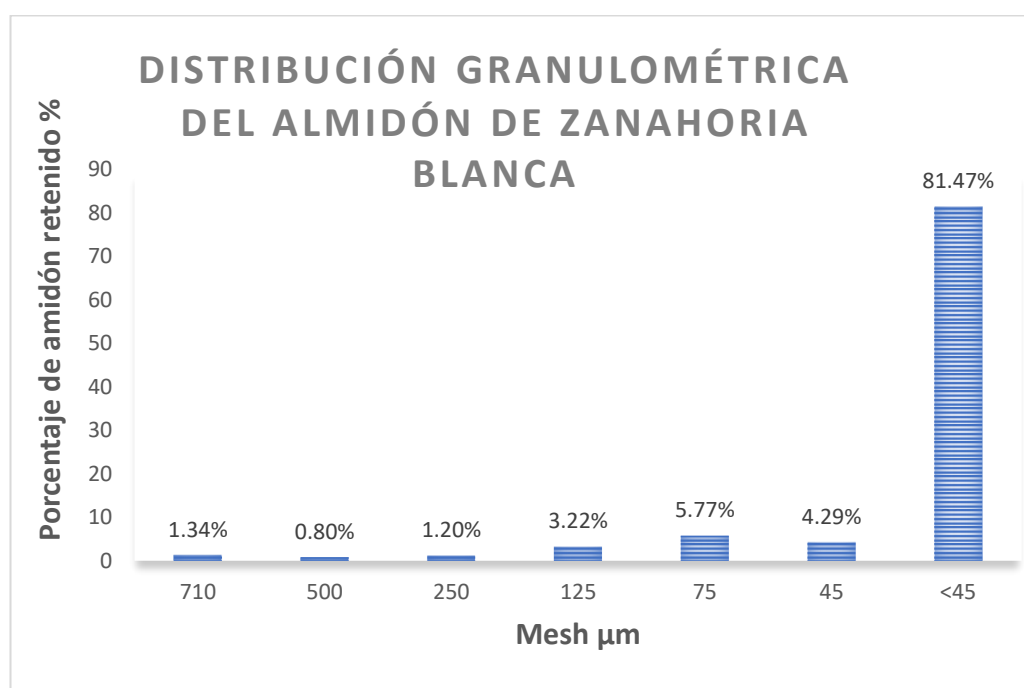


Figura 12. Distribución granulométrica del almidón de zanahoria blanca

2.3 Entalpía y temperatura de Gelatinización

En la Tabla 4 se indica las temperaturas y entalpías del proceso de gelatinización obtenidas para las muestras de AZB y ZBC. De igual manera en la Figura12 se representa el comportamiento de estas muestras a partir de sus termogramas.

Tabla 4. Temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) y entalpía ΔH (J/g) de gelatinización del AZB y ZBC.

	$T_{\text{inicio}}(^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{máxima}}(^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{final}}(^{\circ}\text{C})$	ΔH (J/g)
AZB	56.66 ± 1.52	64.17 ± 1.15	73.66 ± 2.51	19.19 ± 1.83
ZBC	42.81 ± 0.32	54.32 ± 2.23	58.79 ± 1.59	3.36 ± 2.10

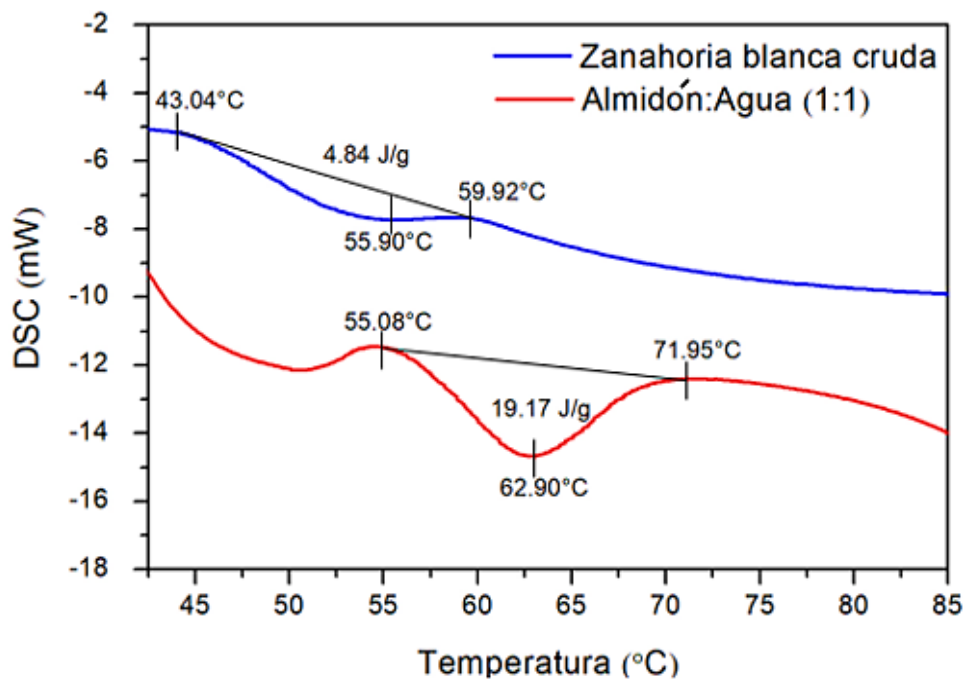


Figura 13. Termograma de gelatinización de una muestra de ZBC Y AZB

2.4 Calor de Combustión

Después de obtener las curvas de aumento de temperatura, como se muestra en la Figura 14, y realizar el cálculo de energía interna correspondiente el resultado de valor energético el para AZB fue 3.62 ± 0.008 Kcal/g o 362.42 ± 0.87 Kcal por 100g.

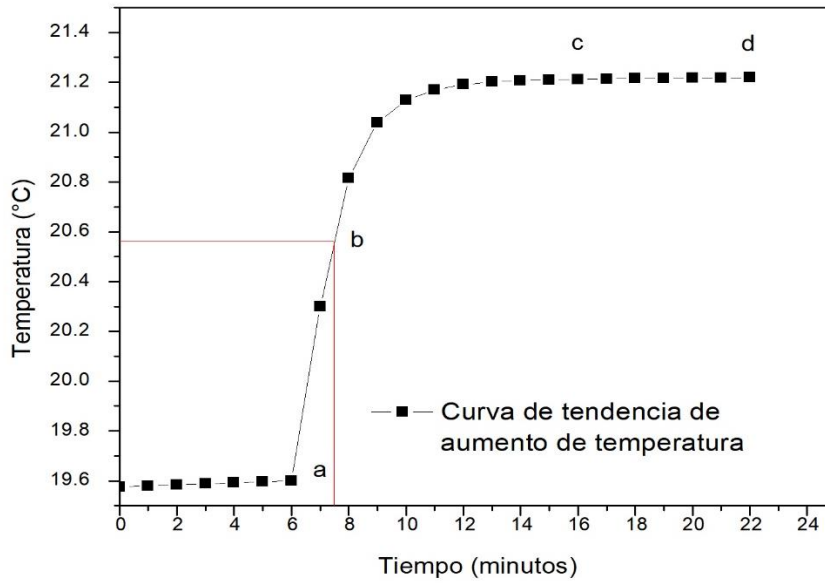


Figura 14. Curva de aumento de temperatura de una muestra de AZB

2.5 Calor específico (c)

El resultado del calor específico de una muestra de AZB fue $1.57 \pm 0.03 \text{ J/g} \cdot \text{K}$. Este valor representa la media de los c obtenidos en un rango de 30 a 60°C. En la Figura 15 se puede visualizar el aumento del c en este rango a temperatura absoluta y su ecuación correspondiente.

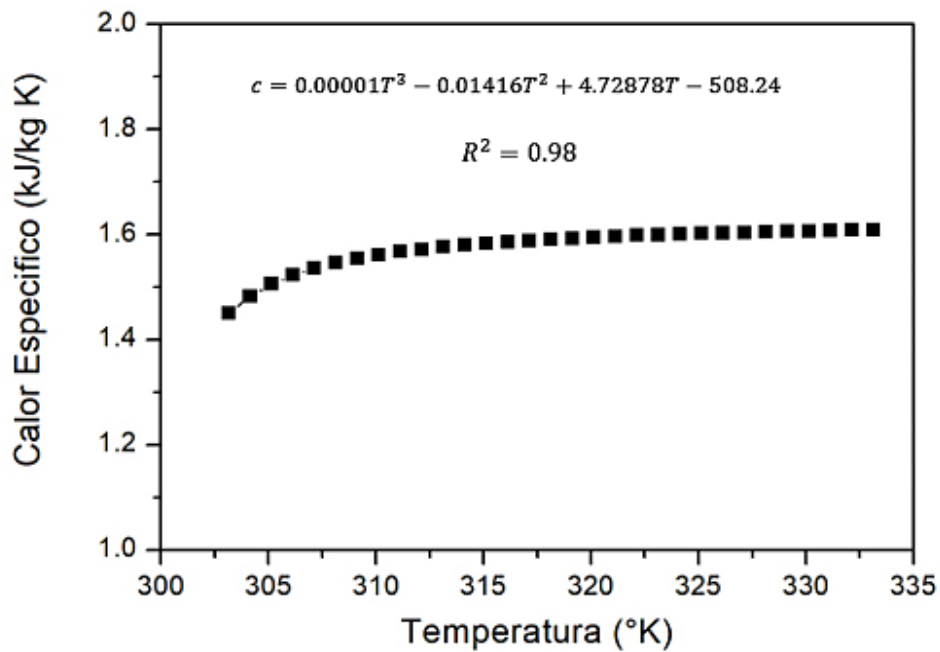


Figura 15. Aumento del c y su ecuación en el rango de 303.15 a 333.15°K

2.6 Porcentaje de cristalinidad del almidón

En la Figura 16 se muestra la superposición del espectro de una muestra de AZB sobre su respectivo arreglo gaussiano en la región de 850 -1250 cm^{-1} del espectro FT-IR del almidón. Como resultado para las dos muestras, almidón de granulometría $>710\mu\text{m}$ y $<40\mu\text{m}$, el porcentaje de cristalinidad fue $50.64 \pm 1.11\%$ y $51.17 \pm 2.10\%$ respectivamente.

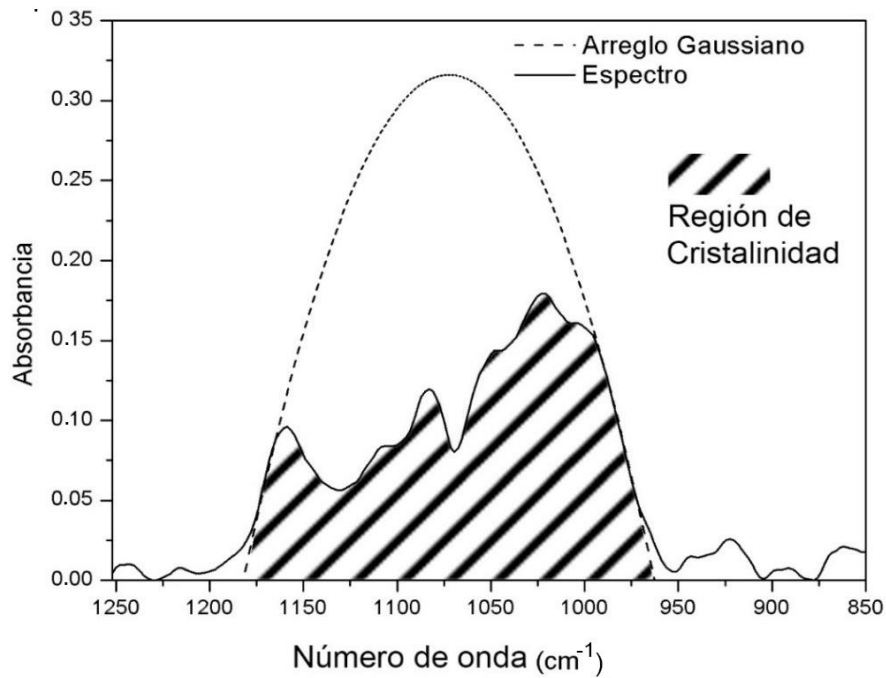


Figura 16. Región de cristalinidad de una muestra de AZB

2.7 Viscosidad

El comportamiento de la viscosidad del AZB a las diferentes temperaturas se expone en la Figura 17. Además, en la Figura 18 se representa la disminución de la viscosidad en términos de la velocidad de cizalla. Finalmente, la Figura 19 muestra los resultados del análisis por componentes principales para el comportamiento del AZB.

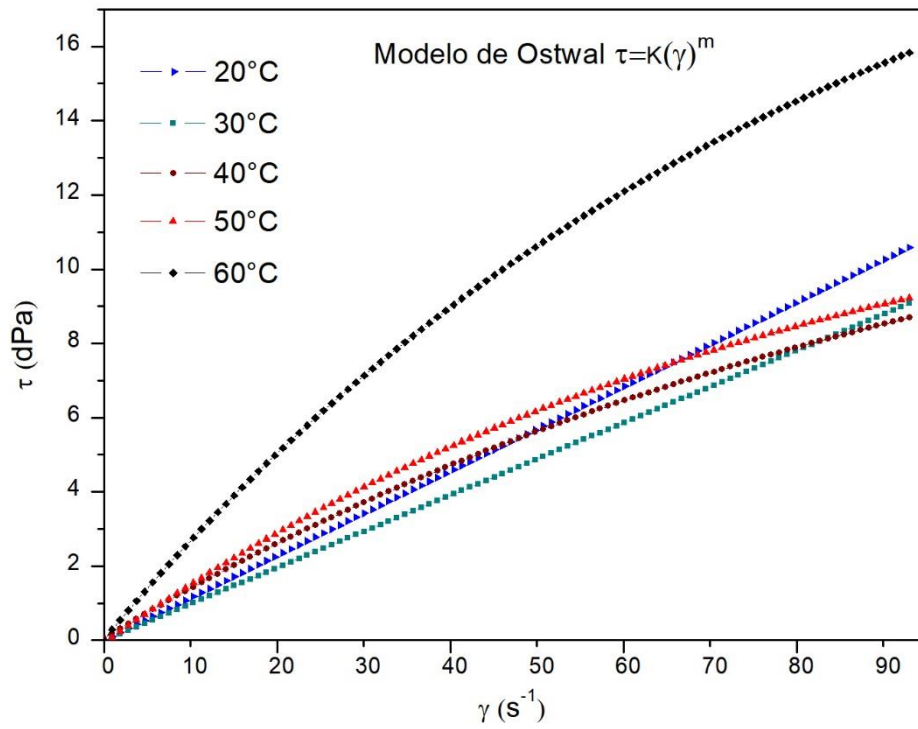


Figura 17. Comportamiento de la viscosidad del AZB en un rango de temperatura de 20°C a 60°C. (τ) esfuerzo de cizalla, (γ) velocidad de cizallamiento

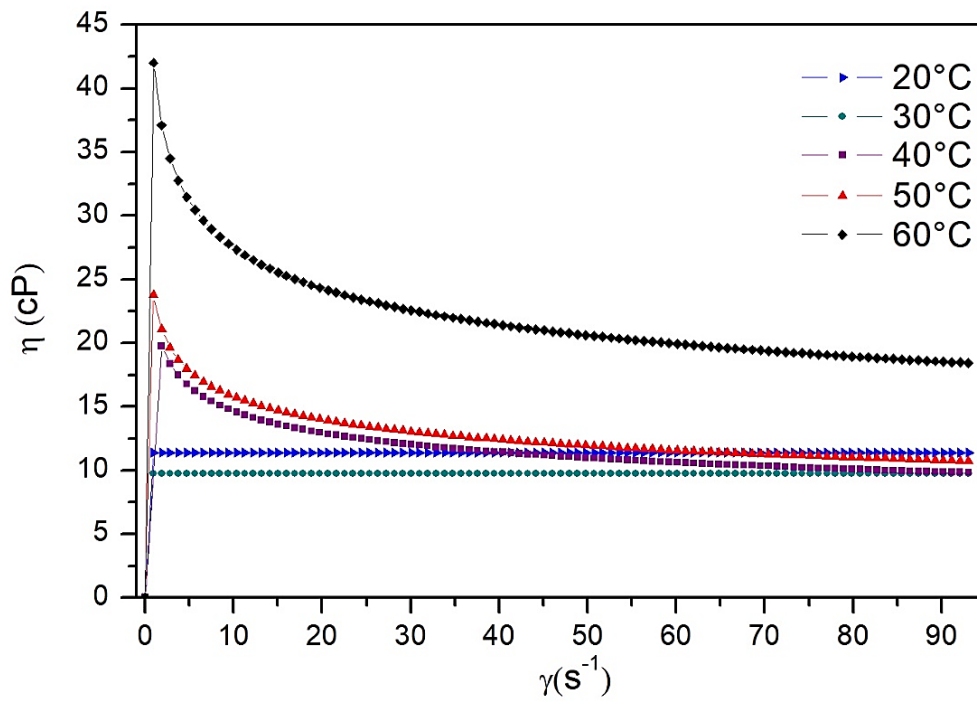


Figura 18. Velocidad de cizalla (γ) vs viscosidad (η)

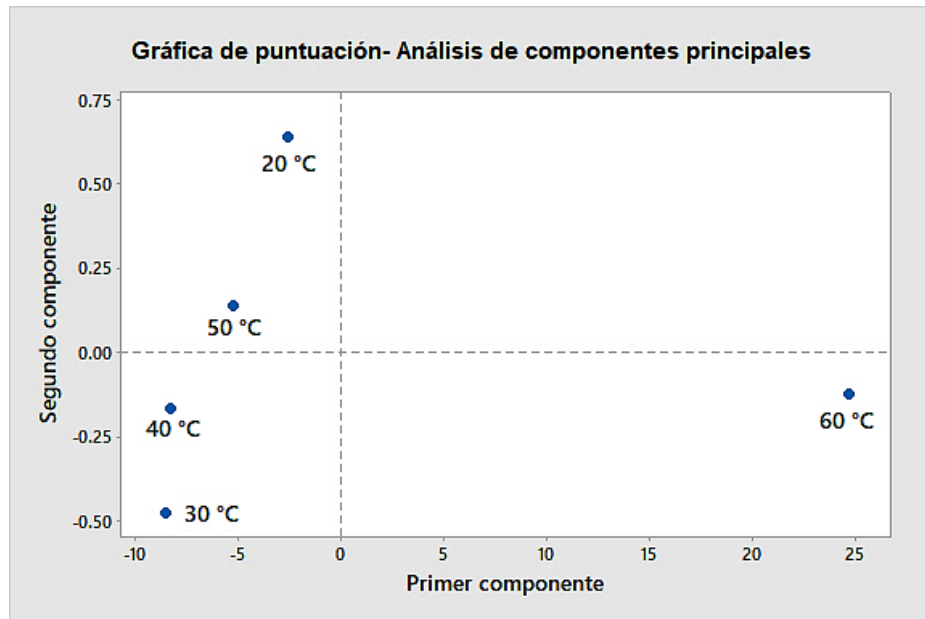


Figura 19. Análisis de componentes principales para el comportamiento de la viscosidad del AZB

2.8 Aplicación de la ley de Fick para determinar el coeficiente de difusión en el secado de zanahoria blanca

En las Figuras 20 y 25 se muestran las curvas de secado, expresado en humedad en base seca (W b.s.) y tiempo (t), para rodajas de zanahoria blanca de 3 y 6 mm de espesor. A partir de estas curvas de secado se determinó el coeficiente de difusión másica de cada muestra analizada, indicados en la Tabla 5.

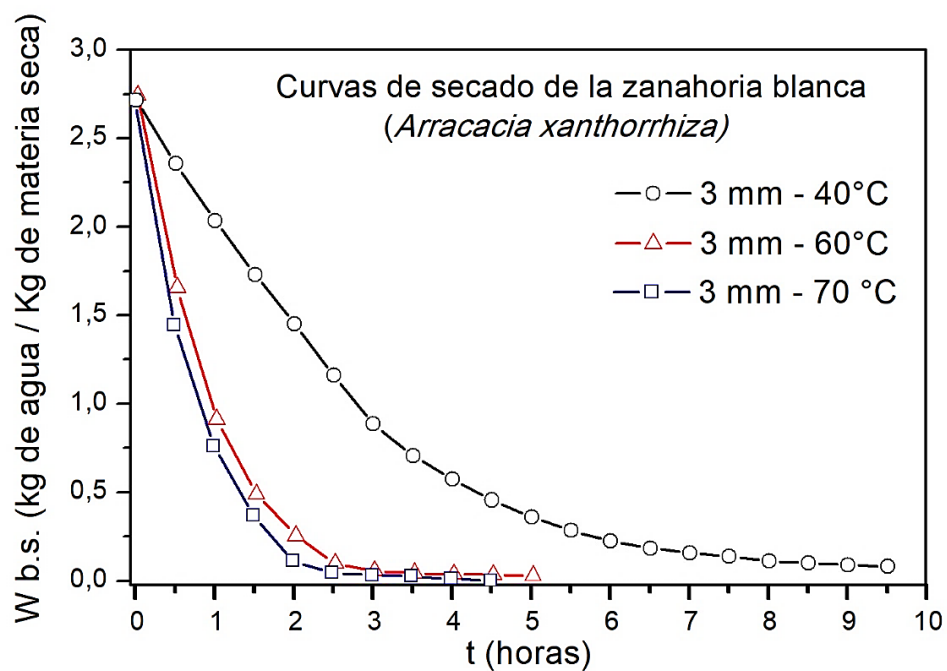


Figura 20. Curva de secado zanahoria blanca rodajas de 3 mm de espesor

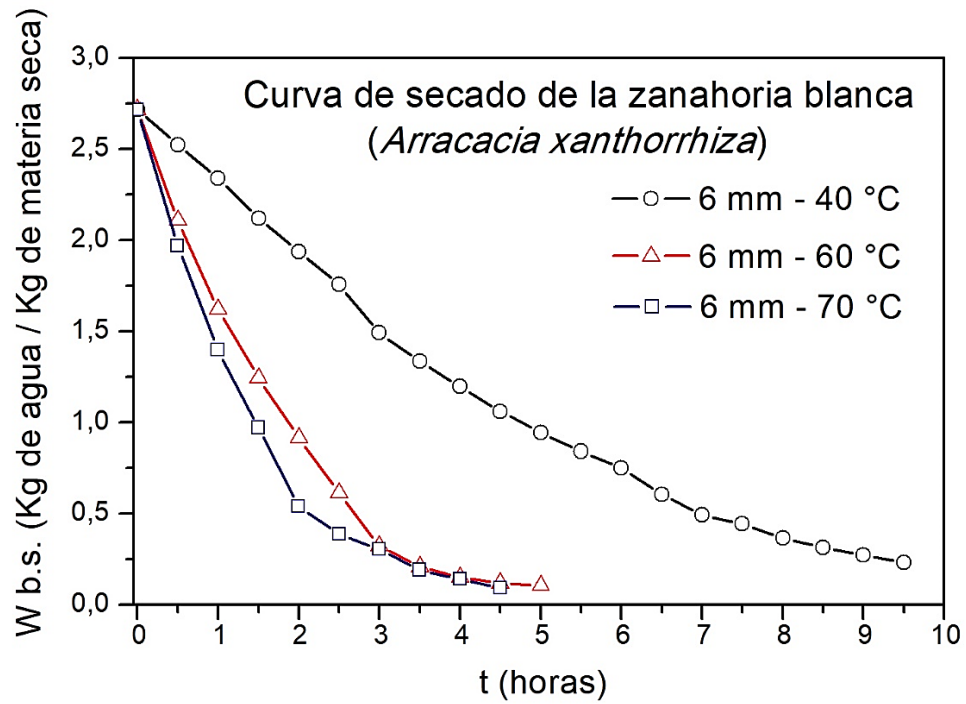


Figura 21. Curva de secado zanahoria blanca rodajas de 6 mm de espesor

Tabla 5. Coeficientes de difusión de masa para las muestras analizadas de zanahoria blanca.

Muestra	Coefficiente de Difusión
Rodajas de 3 mm a 40°C	$D = 1.80 \cdot 10^{-10} [m^2/s]$
Rodajas de 6 mm a 40°C	$D = 3.03 \cdot 10^{-10} [m^2/s]$
Rodajas de 3 mm a 60 °C	$D = 4.16 \cdot 10^{-10} [m^2/s]$
Rodajas de 6 mm a 60 °C	$D = 7.30 \cdot 10^{-10} [m^2/s]$
Rodajas de 3 mm a 70 °C	$D = 4.63 \cdot 10^{-10} [m^2/s]$
Rodajas de 6 mm a 70 °C	$D = 7.71 \cdot 10^{-10} [m^2/s]$

CAPÍTULO 2

DISCUSIONES

La caracterización bromatológica del tubérculo ratificó los valores ya reportados por otros autores como Palacios et al., (2011). Se puede destacar el bajo contenido de grasa y proteínas que, si bien no aporta altamente a la dieta, resulta beneficioso en la industria de jarabes, ya que por el bajo el contenido estos se puede obtener jarabes glucosados más cristalinos (Hernández Medina et al., 2008). Su elevado contenido de agua permite conseguir mayor facilidad de cocción del tubérculo, pero tiene como desventaja la perecibilidad del mismo, además se puede perder compuestos fácilmente por lixiviación. En cuanto a la granulometría, se puede sostener que el almidón es fino ya que la mayoría de sus gránulos (81.47%) son de menor tamaño que 45 μm , esta característica influye mucho en cuanto a propiedades térmicas, ya que los gránulos pequeños tienden a ser más perfectos y resistentes a altas temperaturas, además influirá en el comportamiento reológico pues con gránulos más pequeños la gelatinización se desarrolla más lentamente aunque permite tener texturas más uniformes (Narváez González et al., 2007).

De las propiedades térmicas determinadas, las temperaturas de gelatinización reportadas fueron medianamente elevadas, estos valores son comunes en almidones de alto porcentaje de cristalinidad como de maíz y papa, debido a la energía requerida por la amilopectina para ser fragmentada (Dávila, 2014). En la Tabla 6 se puede evidenciar la cercanía de la temperatura inicial y máxima entre el almidón de papa, maíz y zanahoria blanca, sin embargo, es menor a estos en la temperatura final, esto se debe a que Biliaderis et al., (1980) trabajó con humedad de 46.3% para papa y 46.4% para maíz, menores a la humedad de trabajo del AZB, por lo que requiere mayor rango de temperatura para cumplir con la energía requerida. En el caso del almidón de olluco los valores son significativamente diferentes debido a que el porcentaje de amilopectina (74%) no es tan elevado (Barrera et al., 2004), esto permite confirmar la relación entre la cristalinidad y temperaturas de gelatinización. En cuanto a las temperaturas de la ZBC, no fueron tan altas lo que muestra bajo requerimiento energético para adquirir la gelatinización, aunque el rango del proceso es amplio lo cual indica mayor tiempo en el proceso.

La entalpía de gelatinización también fue alta, superando al almidón de papa que es uno de los almidones con mayor requerimiento de entalpía como se muestra en la Tabla 6, claramente esto es ocasionado por el porcentaje de cristalinidad, pues los valores de entalpía mayores están relacionados con altos niveles de amilopectina ya que a diferencia de la amilosa este requiere de mayor energía para ser fragmentada y lograr que se mantenga en la fase acuosa de la solución (Hernández Medina et al., 2008). A pesar de que el rango de temperatura sea menor que en los otros almidones la entalpía es superior, lo que indica una mayor capacidad de absorción de energía. Caso contrario ocurre con la ZBC, que tiene un rango mayor de temperatura, pero entalpía inferior, proporcional al contenido de almidón en

el mismo, esto significa baja capacidad de absorción de energía y se debe considerar en procesos de ablandamiento y cocción del tubérculo.

Tabla 6. Temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) y entalpía ΔH (J/g) de los almidones de papa, maíz, olluco y zanahoria blanca

Almidón	$T_{\text{inicio}} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{máxima}} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{final}} (^{\circ}\text{C})$	ΔH (J/g)
Papa ¹	55	60	85	18.421
Maíz ¹	60	67	89	13.816
Olluco ²	52.81 ± 0.52	58.93 ± 0.42	67.88 ± 0.34	10.23 ± 0.54
Zanahoria blanca	56.66 ± 1.52	64.17 ± 1.15	73.66 ± 2.51	19.17 ± 1.83

Fuente: (Biliaderis, Maurice, & Vose, 1980) ¹, (Valcácer-Yamani et al., 2013) ²

La propiedad térmica calor de combustión demostró que el valor energético del almidón de zanahoria blanca fue elevado, esto demostró lo afirmado por la bibliografía. Este contenido energético fue superior al de almidones como papa y camote, y se posiciono junto con los almidones de yuca y maíz entre los de alto contenido energético pues sus valores son parejos al compararlos, aunque el de maíz reducirá ligeramente su resultado en base seca. Se debe tener en cuenta que estos resultados de valor energéticos se consideran en almidones en base seca, con excepción del almidón de maíz, por lo que en almidones con contenidos de humedad estos valores aumentarían.

Tabla 7. Valor energético de almidón de maíz, yuca zanahoria blanca, papa y camote

Almidones	Valor energético Kcal
Maíz ^{1*}	381
Yuca ²	364
Zanahoria Blanca	362.42 ± 0.87
Papa ²	316
Camote ²	351

Valores expresados en 100g de almidón en base seca.

* Valor reportado de almidón al 8.32% de humedad

Fuente: (USDA, 2019) ¹, (Vargas Aguilar & Hernández Villalobos, 2013) ²

El bajo contenido de humedad (2.63%) de la muestra de AZB influyó para que el resultado del calor específico sea relativamente bajo y confirma lo establecido por Lan et al., (2000), que expresaron la proporcionalidad de a mayor contenido de agua mayor c . El valor del c obtenido es altamente correspondiente a valores de almidones como el de maíz o trigo como se muestra en la Tabla 8. En comparación con estos el AZB claramente presenta mayor c a menor humedad lo que indica requerir mayor energía para elevar su temperatura, esto nuevamente debido a la composición cristalina de sus gránulos más pequeños. Este dato es

de elevada importancia para determinaciones de requerimientos energéticos para los cuales se deberá tener muy cuenta el contenido de humedad del almidón.

Tabla 8. Calor específico de almidón de zanahoria blanca, maíz y trigo

Almidón	Humedad (%)	Calor Específico ($J/g * ^\circ K$)
Zanahoria Blanca	2.63	1.57 ± 0.03
Maíz ¹	0 - 30	1.26 - 1.80
Trigo ²	8.6 - 22.6	1.36 - 1.59

Fuente: (ASABE, 2008)¹, (Lan, Fang, Kocher, & Hanna, 2000)²

El almidón de zanahoria blanca (AZB) demostró un alto porcentaje de cristalinidad (PC) que aumento en su gránulo más pequeño, aunque la diferencia no es elevada, esto indica que a gránulos más finos la cristalinidad aumenta por la estabilidad cristalina de este. En comparación con otros almidones como se visualiza en la Tabla 9, AZB supera marcadamente en este parámetro siendo el más cercano el almidón de taro, estos datos concuerdan ya que en contenido de amilosa el taro es muy similar (21.4%) a diferencia de los otros almidones que tienen contenidos superiores (Hoover, 2001), con esta comparativa se cumple la relación de a menor cantidad de amilosa mayor PC.

Tabla 9. Porcentaje de cristalinidad de almidón de papa, maíz, zanahoria blanca y taro

Almidón	% Cristalinidad
Papa ¹	36.80 ± 0.50
Maíz ¹	30.90 ± 1.0
Zanahoria blanca ^a	50.64 ± 1.11
Zanahoria blanca ^b	51.17 ± 2.10
Taro ²	45

a: granulometría $>710\mu m$ b: granulometría $<40\mu m$

Fuente: (Sun et al., 2014)¹, (Hoover, 2001)²

Según lo interpretado de las Figuras 17 y 18, el almidón de zanahoria blanca tiene un comportamiento newtoniano a 20 y 30°C, debido a que los gránulos no han adquirido un hinchamiento suficiente lo que provoca que tiendan a precipitar y como resultado se tiene un fluido sin resistencia al corte de cizalla y de viscosidad constante (Juan Sebastián, 2006). Superando los 40°C la viscosidad ligeramente aumenta y su comportamiento cambia paulatinamente al de un pseudoplástico de tipo Ostwal, lo que determina que a pesar de que la viscosidad del almidón sea mayor disminuye a medida que aumenta el cizallamiento. (Carrillo Parra, 2016). Este comportamiento de la viscosidad también se puede confirmar con el análisis de componentes principales realizado, el cual mostró que a temperaturas diferentes el comportamiento varió totalmente siendo a los 60°C donde se notó la mayor distinción de

viscosidad, y justamente es alrededor de esta temperatura donde se consigue la máxima gelatinización. A nivel industrial este comportamiento favorece a la formación de geles y emulsiones a altas temperaturas sin necesidad de un alto tiempo y velocidad de cizallamiento, lo cual permite al almidón formar parte de alimentos con estas características reológicas y térmicas.

En la deshidratación de las muestras de zanahoria blanca, las curvas de secado demostraron que el proceso tiene gran rendimiento a comparación de tubérculos como la remolacha y yuca, ya que los tiempos de secado son menores para llegar al mismo contenido de humedad (Alvarado, 2016). Esto se debe en parte a la estructura de la pared celular del alimento que por su textura demuestra ser menos compleja y compacta, que la remolacha o papa, lo que permite mayor movimiento del agua extracelular, esto se sustenta con el coeficiente de transferencia de agua calculado que de igual manera fue mayor que en la remolacha y papa (Alvarado, 2016). Los coeficientes de difusión obtenidos aumentaron a mayor temperatura y espesor, esta variación corresponde a lo señalado por Chirife (1979). Estos valores reportados por primera vez, ya que no existe esta información actualmente, permitirán determinar los tiempos de secado y criterios con relación a la carga adecuada del producto en los secadores, además proporcionará la energía de activación necesaria para el secado que tendrá la proporcionalidad de a mayor coeficiente de transferencia de masa, mayor energía de activación (Alvarado, 2016).

CONCLUSIONES

La zanahoria blanca y su almidón con la actual investigación demostró tener características competitivas con respecto a otros almidones. De los análisis térmicos lo más destacable del almidón fue su alto requerimiento energético que a su vez le confiere al almidón resistencia a altas temperaturas, característica otorgada principalmente por su fina granulometría y elevado grado de cristalinidad que indican que sus gránulos poseen una estructura interna muy estable y fuerzas intermoleculares fuertes. Esto permite que el almidón sea utilizado en formulaciones de alimentos sometidos a elevadas temperaturas, tales como alimento para bebés, salsas, etc. Otra característica que favorece aún más para ser utilizado en este tipo de alimentos es la viscosidad que demostró formar geles y emulsiones más estables a altas temperaturas y a baja velocidad de cizallamiento. Por lo anterior mencionado, sus características organolépticas y la inexistencia de antinutrientes se puede afirmar que es factible la industrialización del tubérculo como sustituto o base de sistemas alimentarios como el deshidratado que de igual manera demostró ser de gran rendimiento, además es una buena alternativa de conservación considerando la alta perecibilidad del mismo.

La estructura del almidón de zanahoria blanca permite ser altamente digerible y de alto contenido energético por lo cual se recomienda para dietas previo a realizar actividades físicas y de ganancia de pesos, además es recomendado para personas vulnerables a problemas de digestión. Estas características son mayor motivo para que la industria alimentaria la considere como una opción de materia prima.

El análisis de otras propiedades de la zanahoria blanca permitirá complementar la información desarrollada para lograr un entendimiento global de las capacidades del mismo, que favorecerá a la revalorización de este alimento andino que en las últimas décadas fue desplazado, pero que ahora es tomado en cuenta por su gran potencial ya conocido y justamente esto le permitirá ser más competitivo en el mercado nacional e incluso internacional.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado, J. D. D. (2016). *Principios de Ingeniería Aplicados en Alimentos (2da. ed.)*. (D. Autor., Ed.). Ambato-Ecuador.
- Alvarez, M. B., & Santa Cruz, J. (2017). *DETERMINACIÓN DEL CALOR DE COMBUSTIÓN MEDIANTE LA BOMBA CALORIMETRICA*. Retrieved from https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/3_anio/fisicoquimica/files/TP_BOMBA_CALORIMETRICA_2017.pdf
- AOAC. (2012). *Official Methods of Analysis*. Mryland-USA: AOAC.
- ASABE. (2008). ASAE Thermal Properties of Grain and Grain Products. *Asabe (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*, 2003, 1–3.
- Barrera, V., Brito, B., Caicedo, C., Córdova, J., Espín, S., Espinosa, P., Elena, V. (2004). *Raíces y Tubérculos Andinos: Alternativas para la conservación y uso sostenible en el Ecuador*. (V. Barrera, C. Tapia, A. Monteros, E. E. S. Catalina, & INIAP, Eds.). Quito Ecuador - Lima Perú. Retrieved from https://conectarural.org/sitio/sites/default/files/documentos/R0004_completo.pdf
- Biliaderis, C. G., Maurice, T. J., & Vose, J. R. (1980). Starch Gelatinization Phenomena Studied by Differential Scanning Calorimetry. *Journal of Food Science*, 45(6), 1669–1674. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1980.tb07586.x>
- BONNING INSTRUMENT TECHNOLOGY LTD. (2018). *DSC High Temperature Series. Operation Guideline*. Hongshan-China.
- BYK-Gardner. (2013). Viscosidad. *Supplier of Additives and Instruments - BYK Additives & Instruments*, 241–242.
- Carbajal Azcona, Á. (2013). *Manual de Nutrición y Dietética*. Madrid. Retrieved from <https://www.ucm.es/nutricioncarbajal/1>
- Carballo Cuevas, B. Z. (2017). *Obtención y caracterización de almidones termoplásticos obtenidos a partir de almidones injertados con poliésteres biodegradables*. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Retrieved from https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/466/1/PCM_D_Tesis_2017_Cuevas_Zujey.pdf
- Carrero, Y., Dávila, M., Moya, J., Núñez, I., Acosta, M., & Aranda, C. (2018). ZANAHORIA BLANCA (*Arracacia xanthorrhiza bancr*) POTENCIAL FITOFÁRMACO: MINI REVISIÓN. *Investigación Clínica*, 59(July), 109–111.
- Carrillo Parra, A. (2016). *Desarrollo de nuevos nanofluidos. Caracterización y comportamiento reológico*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA. Retrieved from <http://repositorio.upct.es/xmlui/bitstream/handle/10317/6659/tfg-car-des.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Cobo, G., Quiroz, M., & Santacruz, S. (2013). Sustitución parcial de trigo (*Triticum aestivum*) por zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza* B.) en la elaboración de pan. *Avances En Ciencias e Ingenierías*, 5(2), C41–C44. Retrieved from <http://www.usfq.edu.ec/Publicaciones/Avances/>
- Dávila, S. A. (2014). *PROPIEDADES DE FILMS DE ALMIDÓN DE YUCA Y GELATINA. INCORPORACION DE ACEITES ESENCIALES CON EFECTO ANTIFUNGICO*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA. Retrieved from <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/1796/1/T-SENESCYT-00826.pdf>
- de la Fuente Fernández, S. (2011). *Análisis Componentes Principales*. Madrid. Retrieved from http://www.estadistica.net/Master-Econometria/Componentes_Principales.pdf
- García Quesada, J. C. (2008). *TEMA 5. Técnicas reométricas*. Alicante- España: Universidad de Alicante. Departamento de Ingeniería Química.
- Gómez Verdejo, V. (2012). *ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES: VERSIONES DISPERSAS Y ROBUSTAS AL RUIDO IMPULSIVO*. Universidad Carlos III de Madrid. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/30046374.pdf>
- Hernández Medina, M., Torruco Uco, J., Chel Guerrero, L., & Betancur Ancona, D. (2008). Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas*, 28(3), 718–726. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/238445461_Caracterizacion_fisicoquimica_de_almidones_de_tuberculos_cultivados_en_Yucatan_Mexico/fulltext/03a94ee20cf2db3db64698c7/238445461_Caracterizacion_fisicoquimica_de_almidones_de_tuberculos_cultivados_en_Yuc
- Höhne, Q. W., Hemminger, W. F., & Flammershein, H.-J. (2003). *Differential Scanning Calorimetry*. (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Ed.), *Springer* (2da edition). Heidelberg Berlín- Alemania. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-06710-9>
- Hoover, R. (2001). Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. *Carbohydrate Polymers*, 45(3), 253–267. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(00\)00260-5](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(00)00260-5)
- Joline, E. S. (1981). Specific Heat Capacity Measurements Using DSC I. *Hitachi High-Tech Science Corporation*, 1(3), 122–124. <https://doi.org/10.1109/MCG.1981.1673971>
- Juan Sebastián, N. R. (2006). *Fundamentos de Reología de Alimentos*. (J. E-books, Ed.). Cal-Colombia. Retrieved from [https://tarwi.lamolina.edu.pe/~dsa/Fundamentos de Reologia.pdf](https://tarwi.lamolina.edu.pe/~dsa/Fundamentos_de_Reologia.pdf)
- Juliarena, P., & Gratton, R. (2006). Capítulo 2. Generalidades sobre alimentos. (pp. 1–23).
- Lan, Y., Fang, Q., Kocher, M. F., & Hanna, M. A. (2000). Thermal properties of tapioca starch.

International Journal of Food Properties, 3(1), 105–116.
<https://doi.org/10.1080/10942910009524619>

- Macho Aparicio, S. (2002). *Metodologías analíticas basadas en espectroscopia de infrarrojo y calibración multivariante. Aplicación a la industria petroquímica. TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. Universitat Rovira i Virgili. Retrieved from <http://www.tesisenred.net/handle/10803/8981>
- Mazón Ortiz, N., Castillo Torrez, R., Hermann, M., & Espinosa, P. (1996). *La Arracacha o Xanahoria Blanca (Arracachia xanthorrhiza Bancroft) en Ecuador. Micelánea N°67*. Ecuador: DENAREF.
- Moraga, J. (2008). *Determinación del Calor Específico de Murta (Ugni molinae Turcz) y Arándano (Vaccinium corymbosum L.) en un Rango de Temperatura entre 20 °C y 80 °C por el Método de la Calorimetría Diferencial de Barrido*. Retrieved from <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2008/fam828d/doc/fam828d.pdf>
- Narváez González, E., De Dios, J., Cárdenas, F., Taba, S., Tostado, E. C., Álvar, R., & Peniche, M. (2007). *EFFECT OF STARCH GRANULE SIZE ON THE THERMAL AND PASTING PROPERTIES OF MAIZE. Artículo Científico Rev. Fitotec. Mex (Vol. 30)*. Retrieved from <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/30-3/8a.pdf>
- Orrego Alzate, C. E. (2003). *PROCESAMIENTO DE ALIMENTO* (Primera Ed). Manizales-Colombia: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Retrieved from www.avanquest.es
- Ortiz Alcocer, V., López Ocaña, G., Torres Balcazar, C. A., & Pampillón González, L. (2018). Almidón de yuca (Manihot esculenta Crantz) como coadyuvante en la coagulación floculación de aguas residuales domésticas / Cassava Starch (Manihot esculenta Crantz) As a coadyuvant in the coagulation flocculation of domestic wastewater. *CIBA Revista Iberoamericana de Las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 7(13), 18. <https://doi.org/10.23913/ciba.v7i13.73>
- Palacios, R., Morales, M., & Gladys, A. (2011). Evaluación químico bromatológica de tres variedades de *Arracacia xanthorrhiza* "ARAACACHA" *Ciencia e Investigación*, 14(2), 12–14. Retrieved from http://ateneo.unmsm.edu.pe/ateneo/bitstream/123456789/2312/1/ciencia_e_investigacion03v14n2_2011.pdf
- PARR COMPANY INSTRUMENT. (2008). *Operating Instruction Manual No. 204M 1341 Oxygen Bomb Calorimeter*. Moline Illinois-USA. Retrieved from http://www.rofa-praha.cz/files/files/Kalorimetrie/Parr_1341/Parr_1341_EN.pdf
- Parra Fuentes, M. (2018). *VARIABILIDAD GENÉTICA DE SIETE CULTIVARES DE ARRACACHA (Arracacia xanthorrhiza Bancroft) PRODUCIDOS EN LOS MUNICIPIOS DE BOYACÁ Y TURMEQUÉ (BOYACÁ) UTILIZANDO MARCADORES*

MICROSATÉLITES MADELEYNE. UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA FACULTAD. Retrieved from <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/18146/ParraFuentesMadeleyne2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Piqué, T. M., & Vázquez, A. (2012). *USO DE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR) EN EL ESTUDIO DE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO* (Vol. 3). Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/ccid/v3n2/v3n2a4.pdf>

Serrano Martínez, J. L. (n.d.). *ESPECTROSCOPIA INFRARROJA 1-Fundamentos. Espectroscopia infrarroja*. Cartagena-España. Retrieved from https://www.upct.es/~minaees/espectroscopia_infrarroja.pdf

Sun, Y., Wu, Z., Hu, B., Wang, W., Ye, H., Sun, Y., Zeng, X. (2014). A new method for determining the relative crystallinity of chickpea starch by Fourier-transform infrared spectroscopy. *Carbohydrate Polymers*, 108(1), 153–158. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.02.093>

Suriñach, S., Baro, M. D., Bordas, S., Clavaguera, N., & Clavaguera-mora, M. T. (1992). *La calorimetría diferencial de barrido y su aplicación a la Ciencia de Materiales*. Barcelona. Retrieved from <http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/65456/1/098218.pdf>

USDA. (2019). *Basic Report 20027, Cornstarch*. Washington D. C. Estados Unidos.

Vargas Aguilar, P., & Hernández Villalobos, D. (2013). Harinas y almidones de yuca, ñame, camote y ñampi: propiedades funcionales y posibles aplicaciones en la industria alimentaria. *Revista Tecnología En Marcha*, 26(1), 37. <https://doi.org/10.18845/tm.v26i1.1120>

Valcárcel-Yamani, B. Rondán-Sanabria, G. & Finardi-Filho, F. (2013). The physical, chemical and functional characterization of starches from Andean tubers: Oca (*Oxalis tuberosa* Molina), olluco (*Ullucus tuberosus* Caldas) and mashua (*Tropaeolum tuberosum* Ruiz & Pavón). São Paulo. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*. 49(3), 453-464.

VELP. (2006a). *Operation Manual FIWE Raw Fiber Extractors*. Italy: VELP.

VELP. (2006b). *Operation Manual SER 148 Extraction Unit*. VELP.

VELP. (2006c). *Operation Manual UDK 129 Distillation Unit*. VELP.

Villacrés, E., Quelal, M. B., & Alvarez, J. (2013). *Nutrición, procesamiento y gastronomía de raíces y tubérculos Andinos en Ecuador*. Retrieved from <http://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/2816/1/iniapsc302.pdf>