

1-1-2005

Determinación de la constante de difusividad térmica (α) en función de la conductividad térmica k y la capacidad calorífica c_p en la yuca blanca chirosa *Manihot esculenta crantz*

Juan Pablo Beltrán Robles
Universidad de La Salle, Bogotá

Bárbara Hoyos Castaño
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_alimentos

Citación recomendada

Beltrán Robles, J. P., & Hoyos Castaño, B. (2005). Determinación de la constante de difusividad térmica (α) en función de la conductividad térmica k y la capacidad calorífica c_p en la yuca blanca chirosa *Manihot esculenta crantz*. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_alimentos/337

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería de Alimentos by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

**DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE DE DIFUSIVIDAD TÉRMICA (α) EN
FUNCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (k) Y LA CAPACIDAD
CALORÍFICA (c_p) EN LA YUCA BLANCA CHIROZA (*Manihot esculenta
crantz*)**

**JUAN PABLO BELTRÁN ROBLES 43991012
BÁRBARA HOYOS CASTAÑO 43991039**

Director

DANIEL VARELA

Físico MsC

Asesor

Myriam Moncada

Química

Especialista en Control de Calidad de Alimentos

**Trabajo presentado como requisito para optar
al título de Ingeniero de Alimentos**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERIA DE ALIMENTOS
BOGOTÁ D.C
2005**

**DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE DE DIFUSIVIDAD TÉRMICA (α) EN
FUNCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (k) Y LA CAPACIDAD
CALORÍFICA (c_p) EN LA YUCA BLANCA CHIROZA (*Manihot esculenta
crantz*)**

**JUAN PABLO BELTRÁN ROBLES 43991012
BÁRBARA HOYOS CASTAÑO 43991039**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERIA DE ALIMENTOS
BOGOTÁ D.C
2005**

Artículo 95:

Ni la Universidad, ni el asesor, ni el jurado
calificador son responsables por las ideas
expuestas por los estudiantes

**REGLAMENTO ESTUDIANTIL
UNIVERSIDAD DE LA SALLE**

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Al profesor **DANIEL VARELA**; Físico MsC de la Universidad Nacional. Profesor de la Universidad de la Salle, y Director de este trabajo de grado.

A la **DOCTORA LUZ MYRIAM MONCADA** por su increíble paciencia, dedicación y atención para con nosotros y el proyecto, sin ella no se hubiera podido realizar avances importantes y valiosos en el campo de la investigación de la Universidad de la Salle.

A la profesional **BLANCA LILIANA USECHE**; Química y especialista en el área estadística aplicada a alimentos.

A todos y cada uno de los asistentes; **Ruth Rodríguez Andrade** (Asistente de las Plantas de Carnes y Leches), especialmente a **JUAN CARLOS POVEDA** (Asistente de la Laboratorio de Biología y Química), **Ana Maria Castelblanco** (Asistente de Laboratorio de Nutrición Animal) y, **Edgar Tovar y Edgar Moreno** (Asistentes de Laboratorio de Física) de la Universidad de la Salle, por colaborarnos de manera emotiva, constante y desinteresada.

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Jaime Bohórquez
Firma del jurado

Carlos Cardona
Firma del jurado

Bogotá D.C, Junio de 2005

*Este es un buen momento y una buena razón
para agradecer con hechos, el esfuerzo
que mi abuela, padres y hermanos han realizado
con empeño y sacrificio, para que yo convierta
uno de mis sueños personales en un
gran paso para alcanzar el éxito profesional.*

Juan Pablo Beltrán Robles

*Este trabajo esta dedicada especialmente
a mis padres y hermana que con gran esfuerzo
han permitido que un sueño hoy sea una realidad
que debe continuar generando nuevos éxitos.*

Bárbara Hoyos Castaño

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1 MARCO TEÓRICO	4
1.1 LA YUCA	4
1.2 VALOR NUTRICIONAL DE LA YUCA	5
1.2.1 Morfología de la Yuca	7
1.2.2 Variedades de yuca	9
1.3 PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	10
1.3.1 Transferencia de calor por conducción	11
1.3.2 Transferencia de calor por convección	15
1.3.3 Transferencia de calor por radiación	16
1.4 PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES	18
1.4.1 Calor específico (c_p)	18
1.4.2 Relación entre el calor específico y la composición	20
1.4.3 Conductividad térmica	22
1.4.3.1 Conductividad térmica de alimentos	22
1.4.4 Difusividad Térmica	23
1.5 MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD CALORÍFICA	24
1.5.1 Método de las mezclas	24
1.5.2 Método de enfriamiento	25
1.5.3 Métodos eléctricos	26
1.6 PROPIEDADES FÍSICAS	28
1.6.1 Densidad relativa	28

1.6.2	Densidad Aparente	29
1.7	APLICACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR, MATERIA Y MOVIMIENTO EN LOS ALIMENTOS	31
1.7.1	FENÓMENOS DE TRANSPORTE FÍSICOS	31
1.7.2	FENÓMENOS DE TRANSPORTE QUÍMICOS	32
1.7.2.1	Almidón	32
1.7.2.2	Amilosa	33
1.7.2.3	Amilopectina	34
1.7.3	Gelatinización del gránulo y formación de pastas	34
1.7.4	Retrogradación	37
1.7.5	Hidrólisis del almidón	37
1.7.6	Solubilidad de polisacáridos	38
2	MATERIALES Y MÉTODOS	39
2.1	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	39
2.1.1	Diseño de reactores para determinación de la capacidad calorífica	39
2.1.2	Construcción del equipo para determinación de la conductividad térmica	40
2.2	DETERMINACIÓN DE LA PRECISIÓN DE LOS REACTORES	41
2.2.1	Determinación de c_p de los reactores	41
2.2.2	Determinación del c_p del agua como compuesto de referencia	42
2.2.3	Determinación de la k de las placas de la vidrio	43
2.3	DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DE LA YUCA	44
2.3.1	Determinación del c_p	44
2.3.2	Determinación del k	44
2.3.3	Determinación de la difusividad térmica	45

2.4	APLICACIÓN DE MODELOS PREDICTIVOS	45
2.5	DISEÑO EXPERIMENTAL	46
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	48
3.1	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	48
3.1.1	Diseño de reactores para determinación de la capacidad calorífica	48
3.1.2	Construcción del equipo para determinación de la conductividad térmica	49
3.1.2.1	Fuente generadora de vapor	50
3.1.2.2	Cámara de vapor	50
3.1.2.3	Base inclinada	51
3.1.2.4	Láminas de vidrio contenedoras	51
3.1.2.5	Molde de hielo.	52
3.2	PRECISIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	53
3.2.1	Determinación de c_p de los reactores	53
3.2.2	Reactor Cilíndrico	53
3.2.3	Reactor Rectangular	54
3.2.4	Determinación de la precisión de los reactores	56
3.2.5	Reactor Cilíndrico	56
3.2.6	Reactor Rectangular	57
3.2.7	Determinación de la k de las placas de vidrio contenedoras	58
3.3	DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES TÉRMICAS DE LA YUCA	61
3.3.1	Preparación de las muestras	61
3.3.2	Determinación de c_p	63
3.3.3	Reactor Cilíndrico	63
3.3.4	Determinación del k de la yuca	66

3.3.5	Determinación matemática de la difusividad térmica	67
3.3.5.1	Determinación de la densidad aparente en los reactores	68
3.4	APLICACIÓN DE MODELOS PREDICTIVOS Y EXPERIMENTALES	70
3.4.1	Comparativo teórico Vs experimental	71
3.4.1.1	Reactor cilíndrico	71
3.4.1.2	Reactor rectangular	72
3.5	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	72
4	CONCLUSIONES	74
5	RECOMENDACIONES	76
	BIBLIOGRAFÍA	77

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA YUCA BLANCA CHIROZA. (1UI VITAMINA A = 0,3 G RETINOL).	6
TABLA 2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ALGUNAS VARIEDADES DE YUCA EN G POR CADA 100G	7
TABLA 3. FENÓMENOS DE TRANSPORTE PREPONDERANTES EN ALGUNAS OPERACIONES UNITARIAS	32
TABLA 4. PROPIEDADES GENERALES DE ALGUNOS GRÁNULOS DE ALMIDÓN Y DE SUS PASTAS ^A DESDE LA TEMPERATURA INICIAL DE GELATINIZACIÓN HASTA COMPLETAR LA FORMACIÓN DE LA PASTA, ^C PARA LA DESCRIPCIÓN DEL FLUJO LARGO Y CORTO.	36
TABLA 5. DIMENSIONES DE LOS REACTORES CILÍNDRICO Y RECTANGULAR	49
TABLA 6. PROPIEDADES FÍSICAS Y TÉRMICAS DE LOS REACTORES Y PLACAS CONTENDORAS DE VIDRIO.	61
TABLA 7. COMPOSICIÓN DEL PRODUCTO DE EVALUACIÓN EN G POR CADA 100G.	62
TABLA 8. VALORES DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DE LA YUCA DE LOS MODELOS PREDICTIVOS Y EXPERIMENTAL, DONDE ^A ES EL VALOR DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA EN FUNCIÓN DE C _p DEL REACTOR CILÍNDRICO Y ^B EN FUNCIÓN DEL REACTOR RECTANGULAR.	70
TABLA 9. VALORES OBTENIDOS PARA LA CAPACIDAD CALORÍFICA DE LA YUCA EN EL REACTOR CILÍNDRICO EXPRESADA EN CAL/G°C POR EXPERIMENTACIÓN Y APLICANDO MODELO PREDICTIVO ^(A)	71
TABLA 10. VALORES OBTENIDOS PARA LA CAPACIDAD CALORÍFICA DE LA YUCA EN EL REACTOR RECTANGULAR EXPRESADA EN	

CAL/G°C POR EXPERIMENTACIÓN Y APLICANDO MODELO
PREDICTIVO^(A)

72

LISTA DE GRAFICOS

GRÁFICO 1. CAPACIDAD CALORÍFICA DEL REACTOR CILÍNDRICO (1) VS. REACTOR RECTANGULAR (2)	55
GRÁFICO 2. CAPACIDAD CALORÍFICA DEL AGUA EN EL REACTOR CILÍNDRICO (1) VS REACTOR RECTANGULAR (2).	57
GRÁFICO 3. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LAS PLACAS DE VIDRIO 1 Y 2	60
GRÁFICO 4. CAPACIDAD CALORÍFICA DE LA YUCA EN LOS REACTORES CILÍNDRICO (1) Y RECTANGULAR (2).	65
GRÁFICO 5. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LA YUCA EXPERIMENTAL.	67
GRÁFICO 6. DENSIDAD APARENTE EN KG/M^3 DE LA YUCA EN LOS REACTORES CILÍNDRICO (1) Y RECTANGULAR (2)	68

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA YUCA.	8
FIGURA 2. PARÉNQUIMA RESERVANTE EN RAÍZ TUBEROSA DE MANIHOT ESCULENTA, MANDIOCA (DICOTILEDÓNEA), CON GRANOS DE ALMIDÓN.	9
FIGURA 3. TRANSFERENCIA DE CALOR EN PLACAS PLANAS.	12
FIGURA 4. CURVAS DE ENFRIAMIENTO 1 Y 2 PARA DOS LÍQUIDOS CON DIFERENTE CALOR ESPECIFICO.	25
FIGURA 5. CALORÍMETRO CENCO AL SP HT CON AGITADOR	28
FIGURA 6. DENSÍMETRO AEROMÉTRICO.	29
FIGURA 7. CALORÍMETRO CENCO AL SP HT CON AGITADOR EN VISTA FRONTAL Y SUPERIOR.	48
FIGURA 8. REACTORES CILÍNDRICO Y RECTANGULAR	48
FIGURA 9. PROTOTIPO DEL EQUIPO THERMICON PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	49
FIGURA 10. FUENTE GENERADORA DE VAPOR (A) Y CÁMARA DE VAPOR (B) EN EL PROTOTIPO THERMICON PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA K	50
FIGURA 11. BASE INCLINADA DE LA CÁMARA DE VAPOR.	51
FIGURA 12. PLACAS CONTENEDORAS DE VIDRIO, VISTA FRONTAL Y SUPERIOR.	52
FIGURA 13. MOLDE DE ICOPOR USADO COMO CONTENEDOR DEL HIELO	52
FIGURA 14. TAJADORA DE DISCOS PARA CORTE DE LÁMINAS DE YUCA EN DIRECCIÓN TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL	62

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. PLANOS DE LOS EQUIPOS DE MEDICION

ANEXO 2. RESULTADOS INICIALES SIN TRATAMIENTO ESTADISTICO

ANEXO 3. RESULTADOS FINALES CON TRATAMIENTO ESTADISTICO

ANEXO 4. FICHA TECNICA DEL EQUIPO DE CONDUCTIVIDAD TERMICA
MODELO TD-8561

ANEXO 5. GUIAS PRACTICAS PARA LA DETERMINACION DE CAPACI-
DAD CALORIFICA Y CONDUCTIVIDAD TERMICA EN ALIMENTOS.

ANEXO 6. COMPARACION DE LOS VALORES OBTENIDOS EXPER-
MIENTALES Vs. MODELO PREDICTIVO UPV DE LA CAPACIDAD CALO-
RIFICA EN LOS REACTORES CILINDRICO Y RECTANGULAR

INTRODUCCIÓN

El tipo de investigación que se plantea en este trabajo es de tipo exploratorio ya que pretende dar una visión general en los estudios realizados en la yuca. Este tipo de investigación se realiza ya que el tema de la capacidad calorífica y conductividad térmica aunque ha sido explorado, reconocido y establecido con precisión para los sólidos cristalinos, en materiales como los alimentos no es aún muy claro desde el punto de vista de los procesos que ocurren en su interior cuando se someten a un tratamiento térmico.

Este trabajo se realiza como una profundización de un trabajo anterior (“Evaluación de variables y transferencia de calor en los procesos de cocción en inmersión al vapor en la papa R-12, yuca blanca chiroza y plátano hartón en sus dos estados de madurez”, desarrollado por Alba y Murillo. 2004, para la yuca blanca en su variedad chiroza por ser de interés en Colombia como un alimento de consumo masivo en los hábitos alimenticios de los colombianos y altamente calórico por su gran contenido de carbohidratos.

El objetivo de este trabajo es hacer una contribución a la caracterización térmica de la yuca blanca chiroza, donde la transferencia de calor es imprescindible para su procesamiento en el ámbito industrial o casero, así mismo obtener experimentalmente la capacidad calorífica, la conductividad térmica y calcular la difusividad térmica, para compararlos con los obtenidos empleando herramientas predictivas por modelación matemática con el fin de conocer la confiabilidad de los métodos y ecuaciones empleados.

Para el conocimiento de las propiedades térmicas del producto se pretende diseñar y construir equipos junto con sus herramientas y aditamentos, determinando también el grado de precisión a partir de rangos teóricos establecidos con anterioridad como medidas físicas.

Se busca también elaborar una propuesta de una guía práctica junto con sus equipos y herramientas de medición y calibración que permitan determinar las propiedades térmicas de otros alimentos mediante la aplicación del método de determinación directa estandarizado previamente.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar experimentalmente variables térmicas en la yuca blanca chiroza (*Manihot esculenta crantz*) tales como la conductividad térmica (k) y la capacidad calorífica (c_p).

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Diseñar y construir reactores para la determinación de las propiedades térmicas de la yuca.
- Establecer las condiciones de operación de los reactores y muestras para la obtención de datos.
- Comparar los datos obtenidos con los datos disponibles en la literatura.

1 MARCO TEÓRICO

1.1 LA YUCA

Nombre científico: *Manihot esculenta Crantz*

La yuca, es una raíz, en la alimentación y en la supervivencia de la población pobre de las zonas tropicales del mundo, se cultiva y se consume en nuestro país en casi todas las regiones: el Caribe, la Andina y la Amazonía. Además de lo anterior, es indudable el potencial de la yuca como materia prima en la producción de alimentos balanceados para animales y como insumo en las industrias alimenticia y no alimenticia, en las cuales sus presentaciones requieren transformaciones importantes que generan valor agregado¹. La yuca pertenece a la familia *Euphorbiaceae* y al género *Manihot*, que cuenta con más de 180 especies, siendo la de importancia económica la *Manihot Esculenta Crantz*. También conocida como mandioca o cassava, es un arbusto perenne originario de Suramérica y actualmente difundido en zonas tropicales de cerca de 90 países de América, Asia y África.

Las raíces son la principal parte comestible de esta planta, aunque su follaje se aprovecha para alimentación animal en algunas zonas y, en África, se utiliza como verdura fresca para consumo humano.

Por ser una fuente barata de calorías, tiene gran acogida entre los consumidores rurales y urbanos de bajos ingresos. Es la cuarta fuente de calorías en las zonas tropicales después del arroz, el azúcar y el maíz, pues contiene hasta el 35% de su volumen en carbohidratos y hasta 1,5% en proteínas. Por estas razones, se ha considerado como un producto prioritario en la seguridad alimentaria mundial. No

¹ OSPINA, Bernardo. La yuca en el tercer milenio. Palmira: CIAT, 2002

obstante, en Brasil y en Colombia se viene presentando una clara tendencia decreciente en el consumo del producto en fresco y una tendencia moderadamente creciente en el consumo de yuca procesada en las zonas urbanas, consecuencia de su alta perecibilidad y de los precios relativos rural-urbanos marcados por los altos fletes derivados del gran volumen y peso del producto. Debe aclararse que esta tendencia decreciente en el consumo está asociada con los procesos de urbanización y no, como se mencionó anteriormente, con la supuesta condición de bien inferior que se le ha dado a la yuca.

1.2 VALOR NUTRICIONAL DE LA YUCA

La yuca contiene principalmente almidón, una buena fuente de calorías en la dieta humana. Además de constituir materia prima, para numerosas industrias de productos alimenticios que actúan como espesantes, estabilizantes, ligazón, o para material de relleno; y en la industria no alimenticio como material para pegar, estampar, acabados y en lavandería para dar cuerpo y acabado; también en los productos farmacéuticos como diluyente y en otros usos industriales. Las raíces de la yuca tienen de 30 – 40 % de materia seca, la cual depende de, la variedad, la edad de las raíces al momento de cosecha, el suelo, las condiciones climáticas y la sanidad de la planta.² El almidón y los azúcares son los componentes primordiales de la materia seca. La energía metabolizable de la yuca seca es de 3500 – 4000 kcal/g.

En términos generales la yuca se debe considerar principalmente como una fuente energética que contribuye poco a la nutrición de la gente que la consume, debido a ese escaso valor nutricional la yuca ha sido criticada. Sin embargo, la yuca tiene

² FLOREZ, Ethel Soraya y ARARAT, Alfredo Enrique. Conservación y utilización de la yuca (*Manihot esculenta* m) en frituras de comida rápida costeña. 1996

la gran ventaja de ser económica, y se puede usar para satisfacer los requerimientos de la dieta a bajo costo. (Tabla 1)

A continuación se muestra la composición de la yuca blanca chiroza.

Tabla 1. Composición química de la yuca blanca chiroza. (1UI vitamina A = 0,3μg retinol).

Yuca Blanca	Cantidad en 100g de parte comestible
Parte comestible (porcentaje)	80
Calorías (cal)	146
Agua (g)	61,8
Proteína (g)	0,8
Grasa (g)	0,1
Carbohidratos (g)	35,5
Fibra cruda(g)	0,9
Ceniza (g)	0,9
Calcio (mg)	27
Fósforo (mg)	35
Hierro (mg)	0,4
Vitamina A (UI)	10
Tiamina (mg)	0,04
Riboflavina (mg)	0,03
Niacina (mg)	0,5
Ácido ascórbico (mg)	30

Fuente: ICBF Tabla de Composición de Alimentos 1990

En Colombia, se cultiva en diferentes regiones diversas variedades de yuca, las cuales poseen una composición química parecida como se muestra en la (Tabla 2).

Tabla 2. Composición química de algunas variedades de yuca en g por cada 100g

Variedad	Humedad	Proteína	Fibra	Grasa	Ceniza
Llanera	67.9	2.33	0.97	0.18	0.95
Tolimense	61.85	0.40	1.35	0.25	1.54
Armenia Chiroza	67.59	1.71	3.46	0.35	1.59
Costeña	62.18	1.97	2.16	0.30	2.49

Fuente: Cock, Pág. 64. 1989.

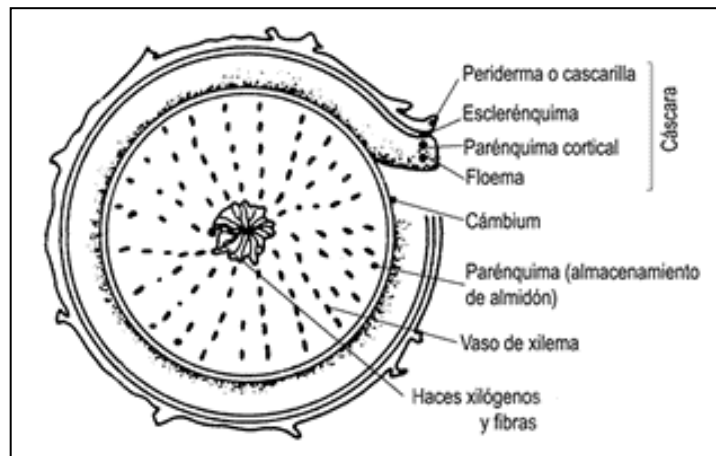
1.2.1 Morfología de la Yuca

La parte mas importante de la raíz es la pulpa también llamada parénquima que está básicamente constituida de haces xilojenos (vasos del xilema) distribuidos en forma de estrías y en los cuales se concentra el almidón. En el centro de la raíz se encuentra el xilojeno fibroso central, mientras en la periferia de la raíz se localiza la corteza o cáscara constituidas de capas superpuestas de tejidos corchozos, fibras esclerenquimatosas, vasos con látex y cambium. La Figura 1 muestra un corte transversal de una raíz. ⁽²⁾

El estudio de una sección transversal de la raíz permite observar básicamente dos partes: la corteza, en la cual están incluidos los tejidos corticales y el floema; y el parénquima xilematico que es la parte comestible. En las raíces adultas, la epidermis desaparece y es remplazada por una película constituida por capas superficiales derivadas del felógeno. Este felógeno forma estratos de parénquima de células muy alargadas, las cuales se desprenden y se secan, y son reemplazadas por nuevas capas. ⁽²⁾

El parénquima o tejido fundamental, es el tejido vinculado a las funciones vegetativas (fotosíntesis, respiración, reserva o almacenamiento, secreción, excreción). Se

lo encuentra en la medula y corteza de los tallos y raíces, formando el mesófilo de la hoja, la pulpa de los frutos carnosos y el endospermo de la semilla.⁽³⁾

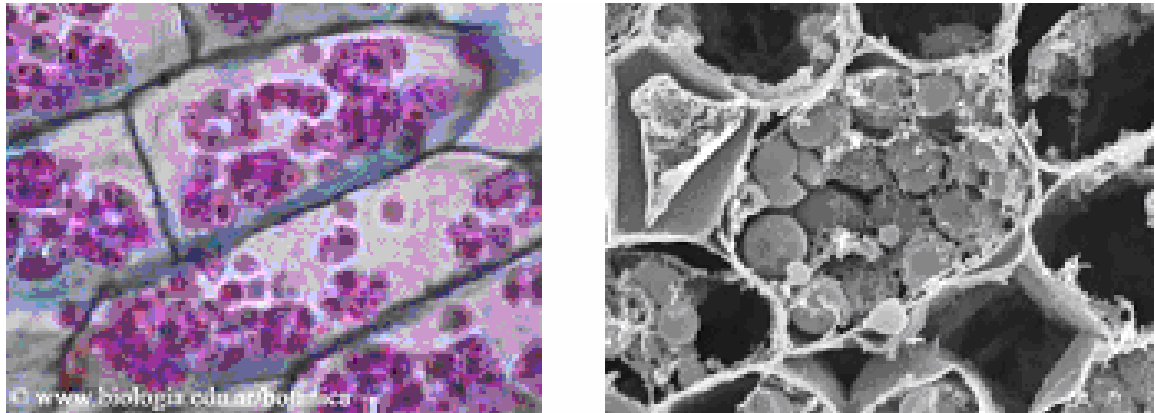


Fuente: OSPINA, Bernardo. La Yuca en el Tercer Milenio. CIAT, 2002.

Figura 1. Sección transversal de la yuca.

El parénquima reservante almacena sustancias de reserva que se encuentran en solución o en forma de partículas sólidas. Los sitios de la célula donde se acumulan estas sustancias son las vacuolas, los plástidos o las paredes celulares.⁽³⁾ (Figura 2). El parénquima reservante se encuentra en raíces engrosadas (zanahoria, remolacha), tallos subterráneos (tubérculo de papa, rizomas), en semillas, pulpa de frutas, médula y partes profundas del córtex de tallos aéreos. En los tallos y raíces de especies leñosas, el protoplasma de las células permanece activo: el almidón se deposita y se remueve en relación con las fluctuaciones estacionales. En los órganos de reserva como tubérculos, bulbos, rizomas, las células son almacenadoras sólo una vez. El protoplasma muere después que se remueven las reservas durante el crecimiento de otros órganos.

³ GONZALEZ, Ana María. Morfología de las plantas vasculares. www.biologia.edu.ar/botanica, 2004



Fuente: Ana Maria González, 2004. www.biologia.edu.ar/botanica.

Figura 2. Parénquima reservante en raíz tuberosa de *Manihot esculenta*, mandioca (Dicotiledónea), con granos de almidón.

1.2.2 Variedades de yuca

Colombia es un país altamente productor de yuca. Actualmente ocupa el tercer lugar en producción en América Latina y Caribe con 1.645 ton/año. Los departamentos de la Costa mas productores son: Córdoba, Bolívar, Sucre, Magdalena, Cesar, Atlántico, Guajira y San Andrés y Providencia. Los departamentos del eje cafetero son: Quindío, Caldas y por ultimo el departamento de Risaralda. La yuquera de los llanos orientales la constituye el departamento del Caquetá, Arauca, Meta y por ultimo Casanare. ⁽¹⁾

Las variedades más consumidas en Colombia son: Brasilera y Playera provenientes de los llanos orientales, Armenia Chiroza y Armenia manzana provenientes del Quindío y la variedad Costeña proveniente de la Costa Atlántica. (Tabla 2)

Para el desarrollo de este trabajo se escogió la variedad Blanca Armenia Chiroza, para continuar con la investigación de la tesis “Evaluación de las variables y trans-

ferencia de calor en los procesos de cocción en inmersión y cocción al vapor en la papa R-12, yuca blanca chiroza y plátano hartón en sus dos estados de madurez”, ya que en este trabajo quedaron algunas inquietudes sugeridas por los autores, ⁴ como:

- Observaron que debido a la fibrosidad y formación de la yuca, el resultado del tiempo calculado no coincidió con el práctico.
- Estructurar los experimentos utilizando equipos que proporcionen mediciones exactas de variables termodinámicas como presión, temperatura...con el fin de conocer con más exactitud los fenómenos ocurridos dentro de los procesos. ⁽⁴⁾

1.3 PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor, en física, es un proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. El calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos.⁵

A continuación se describirán brevemente los tres métodos de transferencia de calor, aunque en nuestro trabajo se empleó únicamente el de conducción.

⁴ ALBA, Oscar Andrés y MURILLO, Diego Fernando. Evaluación de variables y transferencia de calor en los procesos de cocción en inmersión y al vapor en la papa R-12, yuca blanca chiroza y plátano hartón en sus dos estados de madurez. 2003.

⁵ MUÑOZ, Juan Carlos. 2002. Determinación de la difusividad térmica en pasta de murta (*Ugni molinae turcz*) en función de la temperatura. 2002.

1.3.1 Transferencia de calor por conducción

Los primeros adelantos acerca de la conducción de calor se deben, en gran parte a los esfuerzos del matemático francés Fourier (1822), que propuso la ley que hoy se conoce como ley de la conducción de calor de Fourier. Esta ley predice como se conduce el calor a través de un medio, partiendo de una región de alta temperatura a una región de baja temperatura.⁶

La conducción es la forma en que tiene lugar la transferencia de energía a escala molecular. Cuando las moléculas absorben energía térmica vibran sin desplazarse, aumentando la amplitud de la vibración conforme aumenta el nivel de energía. Esta vibración se transmite de unas moléculas a otras sin que tenga lugar movimiento alguno de traslación.⁷

En los metales es habitual la existencia de electrones libres de modo que se tiene lugar a escala molecular debido al desplazamiento de dichos electrones, que son los responsables del transporte de la energía térmica y eléctrica.⁸

La conducción es el método más usado de transmisión de calor en procesos de calentamiento y enfriamiento de materiales sólidos opacos. Si existe un gradiente de temperatura en un cuerpo, tendrá lugar una transmisión de calor desde la zona de alta temperatura hacia la que esta temperatura mas baja. El flujo de calor será proporcional al gradiente de temperatura. ⁽⁷⁾

$$q_x \propto \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Ecuación 1}$$

⁶ KARLEKAR, B V, y DESMOND, R M. Transferencia de calor. Mac Graw Hill. México. 1994 p 9.

⁷ SINGH, Paul. Introducción a la ingeniería de los alimentos. Zaragoza: Acribia. 1998

⁸ SERWAY, A Raymond. Física para ciencias e ingeniería. México. Mac Graw Hill. 2001 p 603

Introduciendo la constante de proporcionalidad a la ecuación anterior obtenemos:

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Ecuación 2}$$

Siendo q_x el flujo de calor por conducción en la dirección x en W , k la conductividad térmica en $W/m \text{ } ^\circ C$, A el área a través de la que fluye calor en m^2 , T la temperatura en $^\circ C$ y x la distancia en m .

Conductividad Térmica en Placas Planas

A continuación se muestra una figura con tres placas planas paralelas, que poseen conductividades térmicas k_1 , k_2 , k_3 , con área A cada una de ellas y que se exponen a un delta de temperatura ΔT , siempre y cuando el flujo térmico aplicado sea constante.

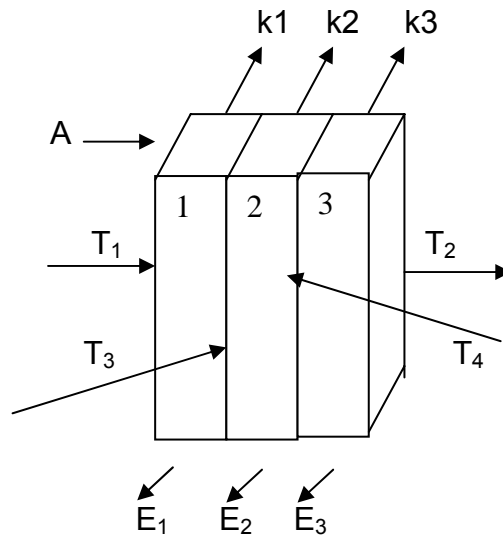


Figura 3. Transferencia de calor en placas planas.

Donde:

- T_1 : Temperatura de la cara izquierda de la placa 1
- T_2 : Temperatura de la cara derecha de la placa 3
- T_3 : Temperatura de la interfase entre la placa 1 y 2
- T_4 : Temperatura de la interfase entre la placa 2 y 3
- E_1, E_2 y E_3 : Espesor de cada una de las placas.
- k_1, k_2 y k_3 : la conductividad térmica de cada placa
- A : Área de cada placa

Si se desea calcular la conductividad térmica de la placa intermedia, es decir, la k_2 , se utiliza H_1 como la rata de transferencia de calor sobre la cara izquierda de la placa 1. Siguiendo la ley de Fourier, para las otras placas 2 y 3, la rata de transferencia de calor H_2 y H_3 es igual, como se muestra en las ecuaciones (3, 4 y 5).

$$H_1 = k_1 \frac{A\Delta T}{E_1} = k_1 \frac{A(T_3 - T_1)}{E_1} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$H_2 = k_2 \frac{A\Delta T}{E_2} = k_2 \frac{A(T_4 - T_3)}{E_2} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$H_3 = k_3 \frac{A\Delta T}{E_3} = k_3 \frac{A(T_2 - T_4)}{E_3} \quad \text{Ecuación 5}$$

Si suponemos que no existen sumideros o espacios de aire entre las placas, el paso de calor es el mismo entre cada una de ellas. (Ecuación 6) Por lo cual el delta de temperatura en cada placa se expresa mediante las Ecuaciones 7, 8 y 9.

$$H_1 = H_2 = H_3 \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\frac{H_1 E_1}{k_1 A} = T_3 - T_1 \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\frac{H_2 E_2}{k_2 A} = T_4 - T_3 \quad \text{Ecuación 8}$$

$$\frac{H_3 E_3}{k_3 A} = T_2 - T_4 \quad \text{Ecuación 9}$$

A partir de las cuales se puede obtener la diferencia de temperatura en los extremos del bloque, es decir la cara izquierda de la placa 1 y la cara derecha de la placa 3. Ecuación (10), expresada en términos de la resistencia.

$$\frac{H_1 E_1}{K_1 A} + \frac{H_2 E_2}{k_2 A} + \frac{H_3 E_3}{k_3 A} = T_2 - T_1 \quad \text{Ecuación 10}$$

Como consecuencia, la rata de transferencia de calor H y A, el área de transferencia de calor de las tres placas es la misma, se obtiene la ecuación simplificada que se ilustra a continuación:

$$\frac{H}{A} \left[\frac{E_1}{k_1} + \frac{E_2}{k_2} + \frac{E_3}{k_3} \right] \quad \text{Ecuación 11}$$

A partir de ella, despejando la conductividad térmica k_2 de la placa central, en este caso particular la muestra tenemos la ecuación:

$$k_2 = \frac{E_2}{\left[\frac{\Delta T * A}{H} - \left[\frac{E_1}{k_1} + \frac{E_3}{k_3} \right] \right]} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde: ΔT : Delta de temperatura de un punto al otro
 E_1 : Espesor vidrio 1
 E_2 : Espesor muestra
 E_3 : Espesor vidrio 2

Para determinar esta conductividad térmica, es necesario establecer la cantidad de calor que se transmite a través del sistema, lo cual se logra usando una medida indirecta de la cantidad de calor en un tiempo t , esta medida es el calor de fusión del hielo (H) utilizada como indicador.

$$H = \frac{m L}{t} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde: m : Masa de hielo fundido en gramos
 L : Calor latente de fusión en Julio/gramo
 t : Tiempo del ensayo en segundos

1.3.2 Transferencia de calor por convección

Cuando un fluido circula alrededor de un sólido, por ejemplo por el interior de una tubería, existiendo un gradiente de temperatura entre ambos tiene lugar un intercambio de calor entre ellos. Esta transmisión de calor se debe al mecanismo de convección. El calentamiento y enfriamiento de gases y líquidos son los ejemplos más habituales de transmisión de calor por convección. Dependiendo de si el flujo del fluido es provocado artificialmente o no, se distinguen dos tipos de transmisión de calor por convección: forzada y libre o natural. La convección forzada implica el uso de algún medio mecánico, como una bomba o un ventilador, para provocar el movimiento del fluido. Por el contrario, la convección natural tiene lugar a causa

de diferencia de densidad provocadas a su vez por gradientes de temperatura. Ambos mecanismos pueden provocar un movimiento laminar o turbulento del fluido. ⁽⁷⁾

El flujo de calor se expresa mediante la ley de Newton, que considera el efecto total de la convección.

$$q = h A(T_p - T_\phi) \quad \text{Ecuación 14}$$

En esta ecuación el flujo de calor q , se expresa en función del gradiente de temperatura $(T_p - T_\phi)$, A es el área en m^2 y h es el coeficiente de transmisión de calor por convección, también llamado coeficiente de transmisión de calor superficial, $(W/m^2 \text{ } ^\circ C)$. ⁽⁷⁾

1.3.3 Transferencia de calor por radiación

Otra forma de transferir energía es la radiación. Todos los objetos irradian energía continuamente en forma de ondas electromagnéticas producidas por vibraciones térmicas de las ondas. Probablemente este familiarizado con la radiación electromagnética en la forma del brillo anaranjado del quemador de una estufa eléctrica, un calentador ambiental eléctrico o las bobinas de un tostador.

Según la **Ley de Stefan** la relación a la cual un objeto radia energía es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta y se representa así:

$$P = \sigma A e T^4 \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde P es la potencia en vatio radiada por el cuerpo, σ es una constante igual a $5,6696 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$, A es el área de la superficie del objeto en m^2 , e es la constante de **emisividad** y T es la temperatura en la superficie en Kelvin. El valor de e puede variar entre cero y la unidad, dependiendo de las propiedades de la superficie del objeto. La emisividad es igual a la fracción de la radiación entrante que la superficie absorbe.

Cuando un objeto radia energía a una rapidez determinada por la ecuación (15), el objeto también absorbe radiación electromagnética. Si no ocurre el segundo proceso, un objeto radiará poco a poco toda su energía y su temperatura podría alcanzar el cero absoluto. La energía que un cuerpo absorbe proviene de sus alrededores, la cual se compone de otros objetos que radian energía. Si un objeto está a una temperatura T y sus alrededores están a una temperatura T_0 , entonces la energía neta ganada o perdida cada segundo por el objeto como consecuencia de la radiación es:

$$P_{net} = \sigma A e (T^4 - T_0^4) \quad \text{Ecuación 16}$$

Cuando el objeto está en equilibrio con sus alrededores, radia y absorbe energía a la misma rapidez, de modo que su temperatura permanece constante. Cuando un objeto está más caliente que sus alrededores radia más energía de la que absorbe y su temperatura disminuye. Un **absorbedor ideal** se define como un objeto que absorbe toda la energía que incide sobre él, y para tal cuerpo, $e = 1$ no absorbe nada de la energía que incide sobre él. Dicho objeto refleja toda la energía incidente y por lo mismo es un **reflector ideal**.⁽⁸⁾

1.4 PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES

Propiedad térmica es la respuesta de un material al ser calentado. A medida que un sólido absorbe energía en forma de calor, su temperatura y sus dimensiones aumentan. La energía puede transportarse a las regiones más frías de la muestra si existe un gradiente de temperatura y finalmente, la muestra puede fundirse. ⁽⁷⁾

El conocimiento de las propiedades de los alimentos es requerido para predecir, diseñar y optimizar muchos procesos que involucran la transferencia de calor, algunas de estas propiedades son el calor específico (c_p), la conductividad térmica (k) y la difusividad térmica (α). ⁽⁷⁾

1.4.1 Calor específico (c_p)

El calor específico es la cantidad de calor ganado o perdido por unidad de peso de producto para provocar un determinado incremento de temperatura sin que tenga lugar un cambio de estado. ⁽⁷⁾

$$c_p = \frac{Q}{m (\Delta T)} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde Q es el calor ganado o perdido en kJ, m es la masa en kg, ΔT es el incremento de temperatura del materia en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) y c_p es el calor específico (kJ/ kg $^{\circ}\text{C}$). ⁽⁷⁾

El calor específico de los gases a presión constante (c_p) es mayor que el calor específico a volumen constante (c_v). En la mayoría de las aplicaciones se utiliza el

calor específico a presión constante, ya que este se mantiene generalmente constante.

Por otro lado, la capacidad calorífica o calor específico de los alimentos está regido por el contenido de agua, de hecho el calor específico y el calor latente de los alimentos se calcula con alguna precisión sobre la base del contenido de agua.⁹

El calor específico de los alimentos se puede expresar mediante la ecuación de Siebel como:

$$c_{p \text{ fresco}} = 3.35a + 0.84 \text{ kJ} / \text{kg}^\circ \text{C} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$c_{p \text{ Congelado}} = 1.26a + 0.84 \text{ kJ} / \text{kg}^\circ \text{C} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde $c_{p \text{ fresco}}$ y $c_{p \text{ congelado}}$ son los calores específicos del alimento antes y después de congelado, a es la fracción de agua contenida del alimento, y $0.84 \text{ kJ/kg}^\circ \text{C}$ representa el calor específico de la porción sólida del alimento. Como se puede observar la ecuación de Siebel no depende de la composición del material por lo cual se puede determinar la capacidad calorífica a partir de la humedad y la porción sólida del alimento.⁽¹²⁾

El calor específico de un producto depende de su composición, humedad, temperatura y presión. El calor específico aumenta con la humedad.⁽⁷⁾

⁹ ÇENGEL y BOLES. Termodinámica. México D.F. Mac Graw Hill. 1999

1.4.2 Relación entre el calor específico y la composición

Es posible predecir el calor específico de un alimento conociendo su composición. Por ejemplo, el calor específico del suero puede ser ligeramente menor que el del agua debido a la presencia de componente sólidos de la leche. Cuando el contenido en grasa aumenta, puede esperarse que el calor específico disminuya. ⁽¹⁰⁾

La forma más sencilla de ecuación para calcular aproximadamente el calor específico c de un alimento es la siguiente:

$$c = m_a c_a + m_s c_s \text{ (kJ / kg}^\circ\text{C)} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde m_a es la fracción de masa del agua, $c_a = 4.18$ kJ/kg K es el calor específico del agua, m_s es la fracción en masa de los sólidos y $c_s = 1.46$ kJ/kg K según (Lamb, 1976) es el calor específico de los sólidos. Esto refleja la mayor contribución debida al contenido en agua. ⁽¹⁰⁾. Una forma alternativa propuesta por Miles (1983) distingue entre grasas y otros sólidos. La ecuación viene dada por:

$$c = (0.5m_g + 0.3m_{sng} + m_a) \text{ (kJ / kg}^\circ\text{C)} \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde m_g , m_{sng} y m_a son las fracciones de masa de la grasa, de los sólidos no grasos y del agua respectivamente ⁽¹⁰⁾. Si es posible obtener un análisis aproximado del alimento, considerando sus componentes se utilizan como subíndice (a: agua, c: carbohidratos, p: proteínas, g: grasa y z: cenizas) puede utilizarse la siguiente ecuación: (Esta ecuación aplica para yuca)

$$c = m_a c_a + m_c c_c + m_p c_p + m_g c_g + m_z c_z \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde m_a , m_c , m_p , m_g y m_z son las fracciones de masa de los respectivos componentes,) y c_a , c_c , c_p , c_g y c_z sus calores específicos. ⁽¹⁰⁾

El calor específico también puede calcularse por medio de las dos ecuaciones empíricas que se muestran a continuación. ⁽⁷⁾

Dickerson (1969) propuso la siguiente expresión para productos cárnicos con un contenido en humedad entre el 26 y 10%, y zumos de frutas con humedad mayor del 50%. ⁽⁷⁾

$$c_p = 1.675 + 0.025w \quad \text{Ecuación 23}$$

En la que w es el contenido en agua (en %).

Para productos de composición conocida puede usarse la siguiente expresión:

$$C_p = 1.424m_c + 1.549m_p + 1.67m_f + 0.837m_a + 4.187m_m \quad \text{Ecuación 24}$$

Las unidades del calor específico son kJ/kg °C y también cal/g °C

Donde.

- m : la fracción en peso
- m_c : de los hidratos de carbono
- m_p : de la proteína
- m_f : de la grasa
- m_a : de las cenizas
- m_m : de la humedad

1.4.3 Conductividad térmica

La conductividad térmica k , de un producto es una medida de la velocidad con la que el calor se transmite a través de un espesor unidad de ese material cuando existe un gradiente de temperatura y esta expresada en $W/m \text{ } ^\circ C$. ⁽⁷⁾

$$k = \frac{J}{s \cdot m \cdot ^\circ C} = \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \quad \text{Ecuación 25}$$

1.4.3.1 Conductividad térmica de alimentos

La mayor parte de los alimentos son malos conductores del calor, y por eso los procesos de transferencia de calor en que la conducción es el mecanismo predominante son lentos ⁽¹⁰⁾. Los tiempos de calentamiento o enfriamiento pueden acortarse mediante operaciones de reducción de tamaño.

La conductividad térmica de un alimento esta influenciada por la composición, al igual que el calor específico; el agua ejerce la mayor influencia. Otros factores que también afectan a la conductividad térmica son la presión, que es particularmente importante en las operaciones de liofilización, y la temperatura. ⁽¹⁰⁾

Hay muchas ecuaciones publicadas que relaciona la conductividad térmica con el contenido de humedad del alimento.

Para pescado:

$$k = 0.0324 + 0.3294m_w \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde m_w es la fracción de masa del agua.

Para obtener la conductividad térmica también pueden utilizarse a la siguiente ecuación obtenida empíricamente por Sweat (1974, 1975).⁽⁷⁾

Para frutas y vegetales con contenido de agua mayor del 60%:

$$k = 0.148 + 0.00493w_w \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde k es la conductividad térmica (W/m °C) y w el contenido de agua en (%).

También Sweat (1986) desarrollo la siguiente ecuación empírica mediante ajuste de unos 430 datos experimentales obtenidos con diversos alimentos sólidos y líquidos.⁽⁷⁾ (esta ecuación aplica para yuca).

$$k = 0.25m_c + 0.155m_p + 0.16m_f + 0.135m_a + 0.58m_m \quad \text{Ecuación 28}$$

Para la determinación de dicha variable se siguieron también dos caminos: el primero correspondiente al cálculo teórico mediante una relación matemática citada por Sweat (1995), la cual establece que la conductividad térmica, esta dado por la suma de las fracciones de los distintos componentes del alimento, multiplicadas cada una por su respectiva conductividad térmica.⁽⁷⁾

1.4.4 Difusividad Térmica

Es la relación entre la densidad aparente (ρ) en kg/m³, la capacidad calorífica (c_p) en J/kg K y la conductividad térmica (k) en W/m °C⁽¹⁰⁾.

¹⁰ ORREGO, Carlos. Procesamiento de alimentos. Manizales. Universidad Nacional de Colombia. 2004

$$\alpha = \frac{\kappa}{\rho * c_p} \quad \text{Ecuación 29}$$

Se usa para la determinación de las velocidades de transferencia de calor en alimentos.

1.5 MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD CALORÍFICA

La calorimetría es la ciencia que mide la cantidad de energía generada en procesos de intercambio de calor, se fundamenta en la medición de la variación de temperatura ocurrida en un medio. Cuando un cuerpo se pone en contacto con otro cuerpo de menor temperatura en un sistema aislado, el cuerpo de mayor temperatura cede calor al de menor temperatura, Ley de enfriamiento de Newton. ⁽¹²⁾

Existen tres métodos para la determinación de la capacidad calorífica, descritos brevemente a continuación, aunque en el desarrollo del trabajo se dará aplicación únicamente al método de mezclas.

1.5.1 Método de las mezclas

La cantidad de energía que se transmite llamada Cantidad de calor q es directamente proporcional a la masa m del cuerpo, a la diferencia de temperatura ΔT y al calor específico c , donde c es la cantidad de energía que absorbe un cuerpo por unidad de masa y por unidad de temperatura. ⁽¹¹⁾

$$q = m c_p \Delta T \quad \text{Ecuación 30}$$

¹¹ MOSSE, Francisco. Calor. www.alipso.com. 2004

Las unidades del calor específico son [cal/g °C].

El balance de energía para el método de mezclas; establece que el calor ganado por una sustancia es igual al calor cedido por los otros sistemas.

$$Calor_{perdido} = Calor_{ganado}$$

1.5.2 Método de enfriamiento

Para una temperatura dada las velocidades de pérdida de calor de dos líquidos contenidos en un calorímetro son iguales. La ley de Newton de enfriamiento establece que la pérdida de calor de un cuerpo es directamente proporcional al exceso de temperatura del cuerpo sobre el ambiente. La muestra de líquido se calienta y coloca en un calorímetro. La temperatura se toma a intervalos regulares mientras el fluido se enfría. El procedimiento se repite usando el mismo calorímetro con un líquido de calor específico conocido. Se obtienen curvas de enfriamiento para los dos líquidos y las velocidades de enfriamiento se determinan a la misma temperatura,¹² como se observa en la Figura 4.

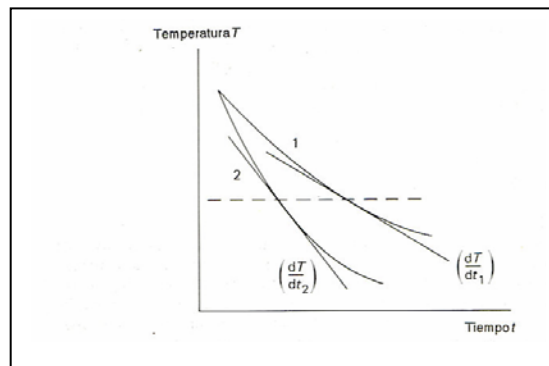


Figura 4. Curvas de enfriamiento 1 y 2 para dos líquidos con diferente calor específico.

¹² LEWIS, M.J. Propiedades Físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado. Zaragoza, Acribia. 1993. p 235.

Si m_1 y m_2 son las masas de la muestra y el control (a menudo agua), c_1 y c_2 son sus respectivos calores específicos, $(dT/dt)_1$ y $(dT/dt)_2$ son sus respectivas velocidades de enfriamiento, y m_c y c_c son la masa y el calor específico del calorímetro entonces:

tasa pérdida calor de muestra = tasa pérdida calor de sus tan cia referencia

$$(m_1 c_1 + m_c c_c) \left[\frac{dT}{dt} \right]_1 = (m_2 c_2 + m_c c_c) \left[\frac{dT}{dt} \right]_2 \quad \text{Ecuación 31}$$

Siendo el calor específico de la muestra la única incógnita, puede ser determinado mediante la ecuación anterior. ⁽¹⁰⁾

1.5.3 Métodos eléctricos

Es posible insertar un elemento eléctrico en un calorímetro que contenga el fluido a ensayar y medir el aumento de temperatura producido en este mediante la aplicación de una corriente de intensidad y voltaje conocidos durante un tiempo determinado. Las pérdidas de calor pueden ser eliminadas enfriando el líquido por debajo de la temperatura ambiente y aplicando energía eléctrica hasta que la temperatura alcance un valor por encima del ambiente, tal que las diferencias de temperatura por encima y por debajo del ambiente sean iguales. ⁽¹⁰⁾

$$VIt = m_c c_c \Delta T + m_1 c_1 \Delta T \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde V en voltio es el voltaje, I es la intensidad de corriente en amperio, t es el tiempo en segundos, ΔT en °C es la diferencia de temperatura, m_1 (kg) y m_c (kg) son las masas del líquido y el calorímetro, respectivamente, y c_1 y c_c (J/kg K) son los calores específicos del líquido y el calorímetro, respectivamente.

También se han diseñado calorímetros de flujo continuo; un líquido pasa a través de un tubo que contiene una resistencia eléctrica, a una velocidad de flujo constante m' (kg/s), con aplicación de un voltaje estacionario V en voltio e intensidad en amperio; el calorímetro se lleva al estado de régimen (las temperaturas de entrada y salida alcanzan un valor constante). En este momento, el calor ganado por el fluido es igual a la energía eléctrica suministrada. ⁽¹⁰⁾ Por consiguiente,

$$m'c_L\Delta T = VI \quad \text{Ecuación 33}$$

La velocidad de flujo puede ser medida, quedando como única incógnita el calor específico c_L del líquido. ⁽¹⁰⁾

Medir el calor ganado o perdido es el tema principal de la calorimetría el calorímetro es el instrumento que mide dicha energía (Figura 5). El tipo de calorímetro de uso más extendido es el calorímetro que consiste en un envase cerrado y perfectamente aislado con agua, un dispositivo para agitar y un termómetro. Para su funcionamiento se coloca una fuente de calor en el calorímetro, se agita el agua hasta lograr el equilibrio, y el aumento de temperatura se comprueba con el termómetro. Si se conoce la capacidad calorífica del calorímetro (que también puede medirse utilizando una fuente corriente de calor), la cantidad de energía liberada puede calcularse fácilmente. Cuando la fuente de calor es un objeto caliente de temperatura conocida, el calor específico y el calor latente pueden ir midiéndose según se va enfriando el objeto. ⁽⁹⁾



Fuente: Francisco Mosse. Calor. www.alipso.com 2004

Figura 5. Calorímetro CENCO AL SP HT con agitador

1.6 PROPIEDADES FÍSICAS

Para realizar posteriores cálculos en la difusividad térmica de la yuca, es necesario conocer el valor experimental de la densidad aparente del producto en los reactores, por ello hacemos una descripción breve sobre la densidad.

1.6.1 Densidad relativa

La densidad es la relación entre la masa de una sustancia y la masa del mismo volumen de agua, es decir, que es una magnitud adimensional. Sin embargo, al tomar como unidad de masa en el sistema métrico decimal, la unidad de volumen de agua, esa relación coincide con la masa de la sustancia por unidad de volumen. Por ello suele entenderse por densidad esta magnitud, que más apropiadamente se llama ahora masa específica. Por definición, la densidad del agua es la unidad. Su masa específica es de 1000 kg / m^3 , o de 1 kg / L . La densidad puede obtenerse de varias formas. Para objetos macizos de densidad mayor que el agua, se determina primero su masa en una balanza, y después su volumen; éste se puede calcular a través del cálculo si el objeto tiene forma geométrica, o sumer-

giéndolo en un recipiente calibrado, con agua, y leyendo el aumento de volumen que experimenta el líquido. La densidad es el resultado de dividir la masa por el volumen.¹³

Según GNU (2004), la densidad en líquidos puede ser medida mediante método aerométrico, (Figura 6), que consiste en un tubo cerrado por los dos extremos, en uno de ellos tiene un lastre y en toda su longitud una escala graduada; se introduce en el recipiente que contiene el líquido que se desea analizar y se lee directamente la densidad en la escala. Las condiciones para que se dé una lectura correcta son: temperatura de 20 °C del líquido, se introduce el densímetro hasta que quede inmóvil, se toma la lectura.



Fuente: GNU, 2004, <http://es.wikipedia.org/wiki/Densidad>

Figura 6. Densímetro aerométrico.

1.6.2 Densidad Aparente

Cuando se mezclan, transportan, almacenan y envasan productos granulados, es importante conocer las propiedades del material en su conjunto. Cuando estos sólidos son colocados en un recipiente, el volumen total ocupado contendrá una

¹³ GNU. Enciclopedia. www.wikipedia.org/wiki/densidad. 2004

sustancial proporción de aire ⁽¹⁰⁾. La porosidad del material envasado es aquella fracción del volumen total que esta ocupada por el aire, dada por la ecuación 21.

$$\frac{\text{Volumen aire}}{\text{Volumen total}} \quad \text{Ecuación 34}$$

La porosidad resultara afectada por la geometría, tamaño y propiedades superficiales del producto. Además, si el envase se agita para apelmazar su contenido, el volumen total y la porosidad del producto disminuirán hasta que eventualmente el sistema alcanza un volumen de equilibrio. La densidad del producto en conjunto bajo estas condiciones, se conoce generalmente como densidad aparente. ⁽¹⁰⁾

La densidad aparente del producto dependerá por lo tanto de una serie de factores como son la densidad de sus componentes, la geometría, el tamaño, las propiedades de superficie y el método de medida. Normalmente, la densidad aparente se determina colocando un peso conocido de polvo 20g (British Standards Institution) o 50 g (resto de Europa), según la Society of Dairy Technology (1980) dentro de un cilindro de medida, agitando el cilindro un cierto numero de veces y determinando el volumen global resultante. ⁽¹⁰⁾

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen global}} \quad \text{Ecuación 35}$$

1.7 APLICACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR, MATERIA Y MOVIMIENTO EN LOS ALIMENTOS

1.7.1 FENÓMENOS DE TRANSPORTE FÍSICOS

Los alimentos son sustancias de origen biológico, con propiedades que difieren de los materiales comunes; son además muy sensibles a las manipulaciones lo que hace que sus procesos de transformación o conservación deban diseñarse y operarse teniendo en cuenta, sus especiales propiedades y la evolución de su calidad e higiene. ⁽¹³⁾

Por la complejidad de su comportamiento reológico los fenómenos de transferencia de momento son más difíciles de analizar y, debido a la interrelación entre momento, transferencias de calor y de masa, tal problema se extiende a todos los fenómenos de transporte. ⁽¹³⁾

Los tres fenómenos físicos en los que se basan las operaciones unitarias son: la transferencia de transporte o cantidad de movimiento, de masa o materia y de calor. (Tabla 3)

El tratamiento matemático riguroso es de mucha utilidad práctica en muchas de las operaciones unitarias de procesos alimenticios; sin embargo es muy importante conocer la fundamentación física y matemática de los fenómenos generales de transporte para tenerlos como referencia permanente y así estar preparado para utilizar herramientas más poderosas en la solución de problemas reales, basadas todas ellas en estos modelos.

Tabla 3. Fenómenos de transporte preponderantes en algunas operaciones unitarias

TRANSFERENCIA DE	OPERACIÓN UNITARIA ALIMENTICIA
Cantidad de movimiento	Circulación de fluidos en conducción
	Circulación de fluidos a través de lechos porosos
	Filtración y ultrafiltración
	Sedimentación
	Decantación centrífuga
	Clasificación hidráulica y neumática
	Agitación y mezcla
Calor	Congelación
	Refrigeración
	Evaporación
	Pasterización y esterilización
Materia	Extracción
	Secado convectivo
	Liofilización

Fuente: Orrego C. E. Curso de Procesamiento de Alimentos. Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales. 2004

1.7.2 FENÓMENOS DE TRANSPORTE QUÍMICOS

Al analizar la composición química de la yuca podemos observar que los carbohidratos representan un porcentaje considerable en dicha composición, por esta razón se hace necesario describir el comportamiento del almidón cuando se somete a un tratamiento térmico.

1.7.2.1 Almidón

Se acumula en los amiloplastos, en células poliédricas, con pequeños espacios intercelulares. Ejemplo: tubérculo de papa, rizoma de *Maranta arundinacea*, raíces de *Manihot esculenta*, cotiledones de porotos, lentejas. En el albumen de trigo,

arroz, cebada, el tejido de reserva es compacto, sin espacios intercelulares. El almidón es la sustancia de reserva alimenticia predominante en las plantas, y proporciona el 70 –80 % de las calorías consumidas por los humanos de todo el mundo. Tanto el almidón como los productos de la hidrólisis del almidón constituyen la mayor parte de los carbohidratos digeribles de la dieta habitual.¹⁴

Los almidones comerciales se obtienen de las semillas de cereales, particularmente de maíz, maíz céreo, maíz rico en amilosa, trigo, varios tipos de arroz, y algunas raíces y tubérculos principalmente patata, batata y tapioca (cassava o yuca). Tanto los almidones como almidones modificados tienen un número enorme de posibles aplicaciones en los alimentos, que incluyen las siguientes; adhesivo, ligante, enturbiantes, formador de películas, estabilizante, texturizante y espesante. El almidón a diferencia de todos los demás carbohidratos en que en la naturaleza se presenta como complejas partículas discretas (gránulos). Los gránulos de almidón son relativamente densos e insolubles, y se hidratan muy mal en agua fría. Pueden ser dispersados en agua, dando lugar a la formación de suspensiones de baja viscosidad que pueden ser fácilmente mezcladas y bombeadas, incluso en concentraciones mayores del 35%. La capacidad de formar soluciones viscosas (capacidad espesante) es alcanzada sólo cuando la suspensión de los gránulos es sometida al calor. Una segunda propiedad única es que la mayoría de los gránulos de almidón están compuestos de una mezcla de dos polímeros; un polisacárido esencialmente lineal denominado amilosa y otro ramificado llamado amilopectina.

1.7.2.2 Amilosa

La mayor parte de la amilosa es una cadena lineal de unidades de α -D-glucopiranosilo unidas por enlaces (1-4), aunque existen también moléculas que poseen

¹⁴ OWEN, Fennema. Química de los alimentos. Zaragoza. Acribia. 2000, p 221-237.

unas pocas ramificaciones en posición (1 -6), alrededor de una cadena de 180 – 320 unidades, o lo que es lo mismo, el 0.3 – 0.5% de los enlaces. Las ramificaciones de la amilosa ramificada pueden ser muy largas o muy cortas, pero los puntos de ramificación están separados por largas distancias, de manera que las propiedades físicas de las moléculas de amilosa son esencialmente las de las moléculas lineales. Las moléculas de amilosa tienen un peso molecular de alrededor de 10^6 .⁽¹⁴⁾

1.7.2.3 Amilopectina

La amilopectina es una molécula muy grande y altamente ramificada, con enlaces de ramificación que constituye alrededor del 4 –5% del total de los enlaces. Las ramas de las moléculas de amilopectina toman forma de un racimo y se presentan como dobles hélices. Pesos moleculares desde 10^7 hasta $5 * 10^8$ hacen que las moléculas de amilopectina se encuentran entre las mas grandes, si no son las mas grandes, de entre las moléculas existentes en la naturaleza. La amilopectina está presente en todo los almidones, constituyendo alrededor del 75% de los almidones más comunes. Algunos almidones están formados exclusivamente por amilopectina, y se le conocen como almidones céreos.⁽¹⁴⁾

1.7.3 Gelatinización del gránulo y formación de pastas

Los gránulos de almidón no dañados son insolubles en agua fría, pero pueden embeber agua de manera reversible; es decir, pueden hincharse ligeramente con el agua y volver luego al tamaño original al secarse. Sin embargo cuando se calientan en agua, los gránulos sufren el proceso denominado gelatinización. La gelatinización es la disrupción de la ordenación de las moléculas en los gránulos. Du-

rante la gelatinización se produce la lixiviación de la amilosa, pero también puede producirse antes de la gelatinización. La Gelatinización total se produce normalmente dentro de un intervalo más o menos amplio de temperatura (Tabla 3), siendo los gránulos más grandes los que primero gelatinizan. La temperatura inicial aparente de gelatinización y el intervalo dentro de la cual tienen lugar dependiendo del método de medida y de la relación almidón – agua del tipo de gránulo, así como de las heterogeneidades en la población de gránulos. ⁽¹⁴⁾

El calentamiento continuado de los gránulos de almidón en un exceso de agua resulta en un mayor hinchamiento de los gránulos, lixiviación adicional de componentes solubles (amilosa principalmente) y, eventualmente, de manera especial si se aplican fuerzas de cizalla, disrupción total de los gránulos ⁽¹⁴⁾. Este fenómeno resulta en la formación de una pasta de almidón. El hinchamiento de los gránulos y su disrupción da lugar a una masa viscosa (la pasta) que consiste en una fase continua de amilosa y/o amilopectina estabilizada y una fase discontinua de restos de los gránulos (membranas y fragmentos). El enfriamiento de una pasta de almidón de maíz caliente resulta en la formación de un gel rígido, firme y viscoelástico.

Tabla 4. Propiedades generales de algunos gránulos de almidón y de sus pastas ^a desde la temperatura inicial de gelatinización hasta completar la formación de la pasta, ^c para la descripción del flujo largo y corto.

	Almidón de maíz común	Almidón de patata	Almidón de yuca	Almidón de trigo
Tamaño del gránulo (eje mayor, μm)	2 -30	5 -100	4 -35	2 -55
Amilosa (%)	28	21	17	28
Temperatura de gelatinización ($^{\circ}\text{C}$) ^a	62 -80	58-65	52-65	52-85
Viscosidad relativa	Media	Muy alta	Alta	Baja
Reología de la pasta ^c	Corta	Muy larga	Larga cohesiva	Corta
Claridad de la pasta	Opaca	Clara	Clara	Opaca
Tendencia a gelificar / retrogradar	Alta	Media a baja	Media	Alta

Fuente: Owen, Fennema. Química de los alimentos. 2000

En las condiciones normales de procesamiento de los alimentos (calor y humedad; si bien es cierto que muchos sistemas alimenticios contienen sólo una cantidad limitada de agua disponible para el almidón), los gránulos de almidón se hinchan rápidamente más allá del punto de reversibilidad. Las moléculas de agua penetran entre las cadenas, rompen los enlaces entre las mismas y establecen capas de hidratación alrededor de las moléculas así separadas. Esto plastifica las cadenas, de manera que se separen totalmente y se solvatan. La entrada de grandes cantidades de agua da lugar a que los gránulos se hinchen hasta alcanzar un tamaño varias veces superior al original. ⁽¹⁴⁾

1.7.4 Retrogradación

El enfriamiento de una pasta de almidón caliente da lugar generalmente a la formación de un gel viscoelástico, firme y rígido. El desarrollo de las zonas de asociación en un gel puede ser considerado como la primera fase del inicio de la cristalización por parte de las moléculas de almidón. Al enfriar y dejar en reposo las pastas de almidón, éste se hace progresivamente menos soluble. En soluciones diluidas las moléculas tienden a precipitar, y este material insoluble es cada vez más difícil de re-disolver por calentamiento. El proceso colectivo de pérdida de solubilidad de almidón disuelto se conoce como retrogradación. La retrogradación del almidón cocinado incluye a los polímeros constituyentes del mismo, amilosa y amilopectina, si bien la primera sufre este proceso de manera mucho más rápida que la segunda. La velocidad de retrogradación depende de diversas variables, entre las que se encuentran; la relación molecular amilosa / amilopectina; las estructuras de las moléculas de amilosa y amilopectina, que vienen determinadas por la fuente botánica del almidón; la temperatura; la concentración de almidón; y por último, la presencia y concentración de otros ingredientes, como surfactantes y sales. ⁽¹⁴⁾

1.7.5 Hidrólisis del almidón

Tipo de reacción química en la que una molécula de agua, con fórmula HOH, reacciona con una molécula de una sustancia AB, en la que A y B representan átomos o grupos de átomos. En la reacción, la molécula de agua se descompone en los fragmentos H + y OH-, y la molécula AB se descompone en A + y B-. A continuación, estos fragmentos se unen proporcionando los productos finales AOH y HB. A este tipo de reacción se le conoce a menudo como doble descomposición o

intercambio. De interés especial es la hidrólisis de diversas sales que origina disoluciones ácidas o básicas. ⁽¹⁴⁾

El almidón es difícilmente soluble en agua fría y en alcohol, pero en agua hirviendo provoca una suspensión coloidal que al enfriarse se vuelve gelatinosa. El agua caliente actúa lentamente sobre el almidón originando moléculas más pequeñas llamadas dextrinas. Esta reacción es un ejemplo de hidrólisis catalizada por ácidos y algunas enzimas. Las dextrinas, como el almidón, reaccionan con el agua formando moléculas aún más simples, para finalmente obtener maltosa, $C_{12}H_{22}O_{11}$, un disacárido, y glucosa, $C_6H_{12}O_6$, un monosacárido. ⁽¹⁴⁾

1.7.6 Solubilidad de polisacáridos

La mayoría de los polisacáridos contienen unidades glicosílicas que, como media, poseen tres grupos hidroxilos. Los polisacáridos son por tanto polioles en los que cada grupo hidroxilo tiene una posibilidad de formar puentes de hidrógeno con una o más moléculas de agua. Asimismo, los átomos de oxígeno del anillo y el glicosídico que conecta un anillo de azúcar a otro, pueden formar también puentes de hidrógeno con el agua. Puesto que todas las unidades de azúcar de la cadena tienen la capacidad de mantener unidas moléculas de agua con gran avidez, los glicanos poseen una fuerte afinidad por ella, y se hidratan con mucha facilidad cuando hay agua disponible. ⁽¹⁴⁾

Los polisacáridos modifican y controlan la movilidad del agua en los sistemas que forman los alimentos, al mismo tiempo que el agua juega un importantísimo papel en las propiedades físicas y funcionales de los polisacáridos. Los polisacáridos y el agua conjuntamente controlan muchas propiedades funcionales de los alimentos, incluyendo la textura. ⁽¹⁴⁾

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Se diseñaron dos reactores; uno cilíndrico con una capacidad de 60.93 cm³ y, otro rectangular con una capacidad de 51.07 cm³ ya que la capacidad del calorímetro empleado CENCO AL SP HT con agitador era de 250 cm³, y se requería de un espacio suficiente para que la termocupla estuviera en contacto con el agua. Para medir la capacidad calorífica experimental según la morfología de la yuca en cortes transversal y longitudinal respectivamente.

Además se construyó un equipo prototipo *Thermicon* basado en el Aparato de Conductividad Térmica Modelo TD-8561, ya que la Universidad de la Salle no posee dicho equipo para realizar mediciones de la conductividad térmica, la ficha técnica del equipo se encuentra en el Anexo 4.

2.1.1 Diseño de reactores para determinación de la capacidad calorífica

Cilíndrico

- Material de construcción: acero inoxidable indx 304
- Tapa rosca
- Capacidad calorífica del material de construcción teórica: 0.10 a 0.15 cal/g °C

Rectangular

- Material de construcción: Platinox (platina en acero inoxidable indx 304) Barras de soldadura en acero inoxidable indx 304.
- La tapa lleva un caucho (material del caucho; propenonitrilo) para un cierre hermético.
- Capacidad calorífica del material de construcción teórica: 0.10 a 0.15 cal/g °C
- Capacidad calorífica del caucho teórica: 0.062 cal/g °C

2.1.2 Construcción del equipo para determinación de la conductividad térmica

Para la construcción del Thermicon se tuvo en cuenta que los materiales fueran aislantes para que no se presentaran pérdidas de calor en él.

Los materiales del Thermicon que se emplearon fueron; vidrio, madera, icopor, caucho y caucho espuma.

Las partes que constituyen el equipo son:

- Fuente generadora de vapor
- Cámara de vapor
- Molde de icopor para hielo
- Base inclinada
- Placas de vidrio contenedoras

2.2 DETERMINACIÓN DE LA PRECISIÓN DE LOS REACTORES

Para determinar la precisión de los reactores se empleó como muestra una sustancia estable (agua) con un valor de capacidad calorífica conocido.

2.2.1 Determinación de c_p de los reactores

Equipos

- Calorímetro de referencia CENCO AL SP HT con agitador
- Probeta de 100 ml (Referencia Brand)
- Estufa con plancha de resistencia eléctrica (Referencia General Electric)
- Recipiente metálico de 500 ml graduado (Referencia IMUSA)
- Termocupla kJ/J/E/R Lutron TM 917, Termómetro de Precisión 0.01 ° C con sensor de Platino Pt 100 Ω
- Reactor cilíndrico y rectangular
- Cronómetro digital (Referencia Casio) con precisión en centésimas de segundo
- Hilo calabres

Para hallar la capacidad calorífica de los reactores debe seguirse el siguiente procedimiento según la guía de calorimetría del laboratorio de Física de la Universidad de la Salle:

- Se pesa el reactor tapado y vacío (con el reactor rectangular el caucho se tiene en cuenta) en una balanza analítica. Se pesa el calorímetro y se anota el valor de la capacidad calorífica correspondiente.

- Se mide un volumen de agua en el calorímetro el cual cubre totalmente el reactor y se mide la temperatura inicial del agua (el calorímetro debe estar tapado y alejado de la estufa).
- Se ata el reactor con hilo calabres de manera que soporte el peso del mismo, dejando una distancia para poder sujetarlo en el momento de retirarlo del agua hirviendo.
- Se introduce el contenedor por 10 minutos en el agua hirviendo y se mide la correspondiente temperatura T_0 del material (temperatura del agua en ebullición).
- Después de transcurrido el calentamiento se pasa el reactor rápidamente y se introduce en el calorímetro. Se tapa el calorímetro y se agita suavemente cada minuto hasta que la temperatura indicada por la termocupla no varíe. Anote el valor de esta temperatura (T_2).
- Se hace el balance de calor (ecuación 17) y se calcula el calor específico del reactor.(Tenga en cuenta el calor específico del aire, hilo, caucho (reactor rectangular), y silicona (sólo en el reactor cilíndrico))
- Se repite el procedimiento descrito y se mide el calor específico para el otro reactor.

2.2.2 Determinación del c_p del agua como compuesto de referencia

Para determinar la precisión de los reactores se emplearon los mismos equipos y se realizó el procedimiento descrito en el numeral 3.2.1, pero en este caso se le agregó agua a los reactores para hallar el c_p de dicha sustancia.

2.2.3 Determinación de la k de las placas de la vidrio

Para hallar la k de la yuca se hace necesario determinar la conductividad térmica de cada una de las placas de vidrios contenedoras. Para obtener dichos valores se siguen las especificaciones de uso y manejo del Aparato de Conductividad térmica Modelo TD-8561:

Procedimiento

- Se llenan totalmente los moldes de icopor con agua y se llevan a congelación (la superficie debe ser totalmente plana para ponerla sobre la placa de vidrio).
- Se llena el erlenmeyer con tubuladura lateral de 500 mL con agua fría, se conecta la manguera de caucho al erlenmeyer y al cuerpo del equipo, luego se tapa la boca con un corcho e introducimos el termómetro de vidrio (0 a $100 \pm 1^{\circ}\text{C}$) (el termómetro no debe tener contacto con el agua ya que se necesita medir la temperatura del vapor).
- Se coloca el erlenmeyer sobre la estufa con plancha eléctrica para que el agua hierva y sólo el vapor pase a la cámara de vapor a través de la manguera.
- Sobre la base de madera inclinada montamos la cámara de vapor conectada a la fuente.
- Se coloca el vidrio sobre la boca de la cámara de vapor evitando la salida del vapor proveniente de la fuente (se espera a que salga vapor o agua condensada por el orificio pequeño).
- Se coloca el molde con el hielo sobre el vidrio caliente superior sin retirar el molde y se recoge la cantidad de agua que se descongela en un recipiente.
- Se mide el volumen de agua descongelada.

- Se realizan los cálculos de transferencia de calor para determinar la k de la otra placa de vidrio contenedora según las ecuaciones 12 y 13.

2.3 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DE LA YUCA

Para hallar la capacidad calorífica y la conductividad térmica de la yuca se utilizan los procedimientos descritos anteriormente.

2.3.1 Determinación del c_p

Para la determinación experimental del c_p de la yuca se tuvieron en cuenta los siguientes datos fuente:

- Humedad de la yuca en %
- Masa del contenedor, calorímetro, caucho, aire, y agua en g
- c_p del contenedor, agua, aire, calorímetro, caucho y silicona en cal/g °C
- Volumen de agua en el calorímetro en mL
- Temperatura del agua inicial en °C
- Temperatura del agua en ebullición en °C
- Temperatura final en el calorímetro en °C

2.3.2 Determinación del k

Para la determinación experimental del k se tuvieron en cuenta los siguientes datos fuente:

- Humedad de la muestra de yuca en %
- Masa de agua fundida en g
- Calor latente del agua en J/s
- Tiempo de la prueba en s
- Conductividad térmica de los vidrios en W/m °C
- Diámetro del hielo en m
- Temperatura del vapor y descongelación en °C
- Espesor de los vidrios y de la yuca en m

2.3.3 Determinación de la difusividad térmica

Para obtener el valor de la difusividad térmica se necesitan los siguientes datos fuente:

- Conductividad térmica del producto en W/m°C
- Capacidad calorífica del producto para cada uno de los reactores en cal/g °C
- Densidad aparente para cada uno de los reactores con el producto en kg/m³

2.4 APLICACIÓN DE MODELOS PREDICTIVOS

Con el fin de establecer un comparativo de los resultados obtenidos experimentalmente recurrimos a algunos modelos predictivos matemáticos los cuales tienen en cuenta los porcentajes de composición de los alimentos y la temperatura a la cual son sometidos.

Los modelos matemáticos para capacidad calorífica y conductividad térmica se encuentran descritos anteriormente en los numerales 1.4.2 y 1.4.3.1 respectivamente.

El modelo con el cual se realizó la comparación con los valores experimentales es un programa para el cálculo de las propiedades termodinámicas de los alimentos chilenos disponible www.upv.es/dtalim/herraweb.htm. III taller, en el cual se puede determinar la capacidad calorífica y la conductividad térmica con su respectiva unidad en función de la temperatura.

2.5 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para el diseño experimental se establecieron una serie de características que influenciaban en la capacidad calorífica y la conductividad térmica de la yuca de las cuales fueron seleccionados; forma del reactor según el corte de la yuca y forma de los vidrios teniendo en cuenta los antecedentes del equipo de conductividad Modelo TD 8561.

En cada característica se definió un diseño completamente aleatorizado en el cual se definieron especificaciones para la capacidad calorífica (tiempo y temperatura) y para la conductividad térmica de la yuca (tiempo, gradiente de temperatura, calor de fusión del hielo, y el k de las placas contenedoras).

Para el estudio se definieron mínimo 5 réplicas para los instrumentos de medición que estadísticamente tiene menor variabilidad para los diversos ensayos, pero en yuca y en la determinación de la precisión de los reactores por la variabilidad de los productos y para reducir la dispersión se trabajaron 20 repeticiones.

Se realizaron comparaciones entre los valores de la capacidad calorífica de los reactores (rectangular Vs cilíndrico), la determinación de la precisión de los mismos (rectangular- agua Vs cilíndrico-agua), la capacidad calorífica de la yuca (reactor rectangular Vs cilíndrico), conductividad térmica de las placas contenedoras (Vidrio1 Vs Vidrio 2), y densidad aparente de la yuca (reactor rectangular Vs cilíndrico) con tratamientos de manera independiente.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

A continuación se muestra el montaje del calorímetro, reactor y termocupla para la determinación del c_p y las respectivas dimensiones de los reactores en la tabla 5.

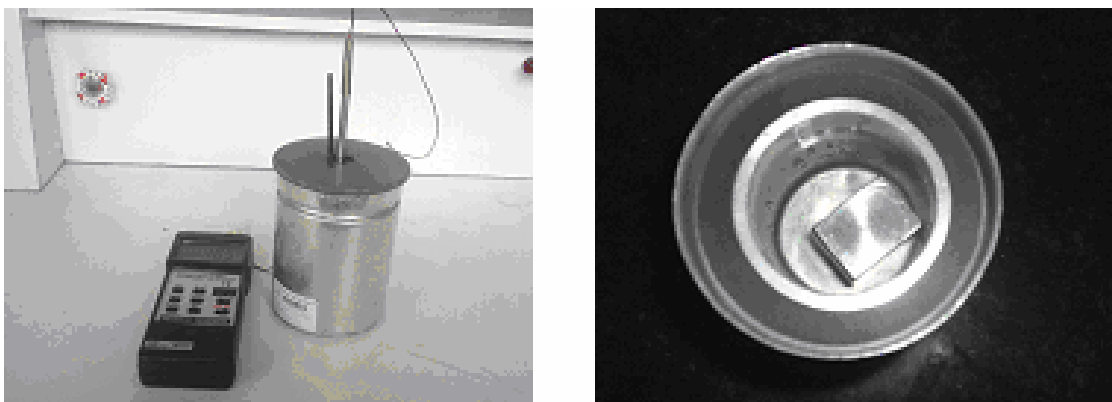


Figura 7. Calorímetro CENCO AL SP HT con agitador en vista frontal y superior.

3.1.1 Diseño de reactores para determinación de la capacidad calorífica



Figura 8. Reactores cilíndrico y rectangular

Tabla 5. Dimensiones de los reactores cilíndrico y rectangular

Características	Cilíndrico	Rectangular
Altura externa (cm)	7,90	4,80
Altura interna (cm)	6,40	3,90
Diámetro externo (cm)	4,70	
Diámetro interno (cm)	3,90	
Largo (cm)		3,80
Ancho (cm)		3,10
Tapa diámetro externo (cm)	4,70	
Tapa diámetro interno (cm)	3,90	
Tapa longitud externa (cm)		2,80
Tapa longitud interna (cm)		2,20
Espesor de pared (cm)	0,40	0,30
Espesor de fondo (cm)	0,26	0,40
Profundidad de tapa (cm)	1,30	0,70
Capacidad calorífica cal/g°C	0,10-0,15	0,10-0,15

3.1.2 Construcción del equipo para determinación de la conductividad térmica

Se construyó un equipo llamado Thermicon para medir la conductividad térmica experimental según la morfología de la yuca con corte longitudinal y la conductividad térmica de las placas de vidrio contenedoras.



Figura 9. Prototipo del equipo Thermicon para la determinación de la conductividad térmica

3.1.2.1 Fuente generadora de vapor

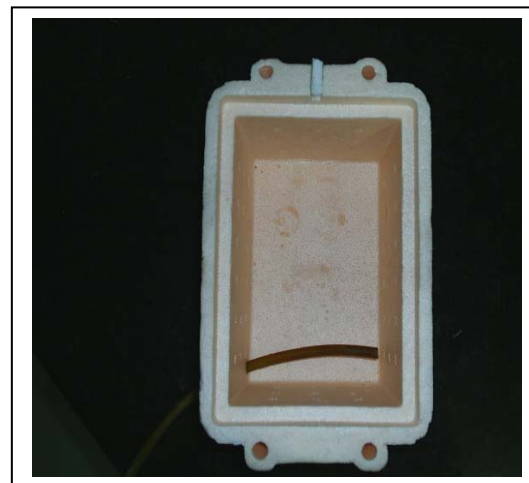
Consta de un erlenmeyer de vidrio con tubuladura lateral, capacidad 500 ml, dotado de un tapón de caucho con un termómetro (0-110 \pm 1°C), que garantiza la medición de la temperatura del vapor al no entrar en contacto con el agua en ningún momento. Medio calefactor plancha de resistencia eléctrica. En la tubuladura se colocó una manguera de caucho por la que transporta vapor de agua hasta la cámara de vapor como se observa en la Figura 10 (a).

3.1.2.2 Cámara de vapor

Consta de un caja rectangular de icopor de medidas de 15,5 cm alto * 28,5 cm de largo * 18 cm de ancho con dos orificios; uno para conectar la manguera proveniente de la fuente de vapor, y otro para drenar el vapor de agua dentro del equipo como se observa en la Figura 10 (b). (Ver Planos Anexo 1 Fig. 9)



(a)



(b)

Figura 10. Fuente generadora de vapor (a) y Cámara de vapor (b) en el prototipo Thermicon para la determinación de la conductividad térmica k

3.1.2.3 Base inclinada

Es una base de triplex comprimido con tres láminas; una con medidas de 8.5 cm de largo * 10 cm. de ancho y un espesor de 1.3 cm, las otras dos con medidas de 20 cm. de largo * 10 cm. de ancho y un espesor de 1.3 cm, con un ángulo de inclinación de 94 °, como se observa en la figura 11. (Ver Planos Anexo 1 Fig. 10 y 11)

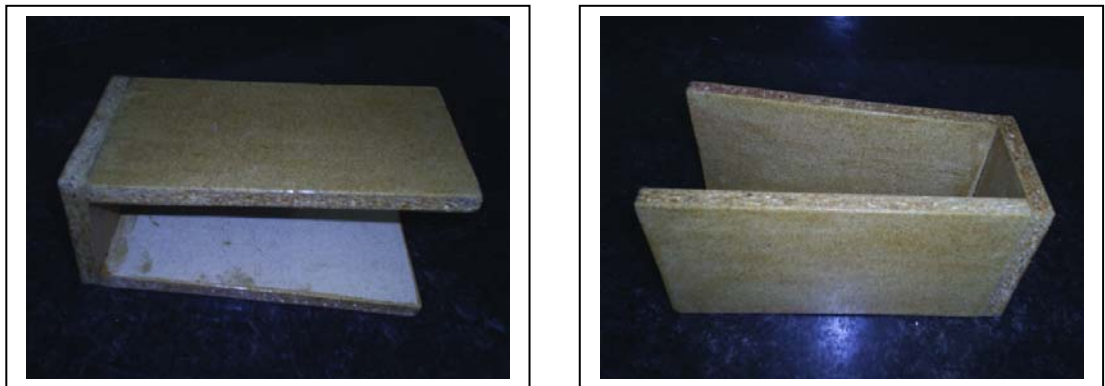


Figura 11. Base inclinada de la cámara de vapor.

3.1.2.4 Láminas de vidrio contenedoras

Son dos láminas de vidrio con espesor de 3 milímetros, una lámina tiene en forma de cono un cierre de caucho espuma para evitar pérdidas de agua de 1 cm. de medidas; 22.7 cm. de largo * 15.7 cm. de ancho, y la otra lámina no tiene dicho cierre, como se observa en la figura 12. (Ver Planos Anexos 1 Fig. 12 y 13)

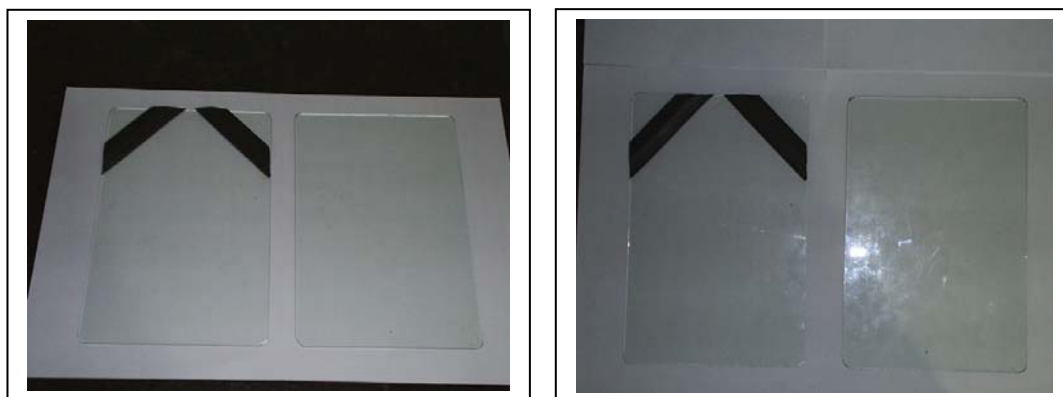


Figura 12. Placas contenedoras de vidrio, vista frontal y superior.

3.1.2.5 Molde de hielo.

Es un vaso de icopor con una capacidad de 24 onzas (0.68 litros) para llenar totalmente de agua y llevar el agua a su punto de congelación, como se observa en la siguiente figura 13. (Ver Planos Anexo 1 Fig. 14)



Figura 13. Molde de icopor usado como contenedor del hielo

3.2 PRECISIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

A continuación se muestran los cálculos a partir de los balances de transferencia de calor en ambos reactores, en la determinación de la precisión de los mismos en porcentaje luego de aplicar el tratamiento estadístico correspondiente.

3.2.1 Determinación de c_p de los reactores

Para hallar la capacidad calorífica de los reactores se partió de la ecuación 23 en la que se despejó el valor de la c_p de los reactores cilíndrico y rectangular.

3.2.2 Reactor Cilíndrico

En el caso del reactor cilíndrico ya que tiene una tapa de rosca no se tiene en cuenta la c_p del caucho.

$$\text{Calor}_{\text{ganado}} = \text{Calor}_{\text{perdido}}$$

$$\begin{aligned} m_{\text{acero}} c_p \text{acero} (T_2 - T_1) + m_{\text{aire}} c_p \text{aire} (T_2 - T_1) + m_{\text{hilo}} c_p \text{hilo} (T_2 - T_1) + m_{\text{silicona}} c_p \\ \text{silicona} (T_2 - T_1) = m_{\text{agua}} c_p \text{agua} (T_2 - T_1) + m_{\text{calorímetro}} c_p \text{calorímetro} (T_2 - T_1) \\ 399 \text{ g} * c_p \text{acero} * (91,9 - 31,5) ^\circ \text{C} + 0,0539 \text{ g} * 0,23 \text{ cal/g } ^\circ \text{C} * (91,9 - 31,5) ^\circ \text{C} + 2 \text{ g} \\ * 0,324 \text{ cal/g } ^\circ \text{C} * (91,9 - 31,5) ^\circ \text{C} = 180 \text{ g} * 1 \text{ cal/g } ^\circ \text{C} * (31,5 - 18,2) ^\circ \text{C} + 47,4 \text{ g} \\ * 0,22 \text{ cal/g } ^\circ \text{C} * (31,5 - 18,2) ^\circ \text{C} \\ c_p \text{ reactor} = 0,10 \text{ cal / g } ^\circ \text{C} \end{aligned}$$

3.2.3 Reactor Rectangular

En el caso del reactor rectangular no se tiene en cuenta el c_p de la silicona.

$$\text{Calor}_{\text{perdido}} = \text{Calor}_{\text{ganado}}$$

$$m_{\text{acero}} c_{p \text{ acero}} (T_2 - T_1) + m_{\text{aire}} c_{p \text{ aire}} (T_2 - T_1) + m_{\text{caucho}} c_{p \text{ caucho}} (T_2 - T_1) + m_{\text{hilo}} c_{p \text{ hilo}}$$

$$(T_2 - T_1) = m_{\text{agua}} c_{p \text{ agua}} (T_2 - T_1) + m_{\text{calorímetro}} c_{p \text{ calorímetro}} (T_2 - T_1)$$

$$200 \text{ g} * c_{p \text{ acero}} * (92,1 - 30) ^\circ \text{C} + 0,0539 \text{ g} * 0,23 \text{ cal/g } ^\circ \text{C} * (92,1 - 30) + 0,2078 \text{ g} *$$

$$0,062 \text{ cal / g } ^\circ \text{C} * (92,1 - 30) ^\circ \text{C} + 2 \text{ g} * 0,324 \text{ cal/g } ^\circ \text{C} * (92,1 - 30) ^\circ \text{C} = 200 \text{ g} * 1$$

$$\text{cal/g } ^\circ \text{C} * (30 - 17,4) ^\circ \text{C} + 47,4 \text{ g} * 0,22 \text{ cal/g } ^\circ \text{C} * (30 - 17,4) ^\circ \text{C}$$

$$c_{p \text{ reactor}} = 0,14 \text{ cal/g } ^\circ \text{C}$$

Las tablas de resultados iniciales sin tratamiento estadístico se encuentran en el Anexo 2.

Al aplicar el análisis estadístico descriptivo de los datos obtenidos éste presentó valores medio de 0.10 cal/g °C en el reactor rectangular y 0,13 cal/g °C en el cilíndrico con una dispersión de la información de 1,01% en el cilíndrico y 1,76 en el rectangular, demostrando la posibilidad de diferencias significativas entre los mismos. (Ver Anexo 3. No 30)

Como se puede observar en la Gráfico 1, los valores del reactor rectangular (1) se encuentran muy alejados de los valores del rector cilíndrico (2), ni siquiera el máximo valor del reactor rectangular concuerda con el valor mínimo del cilíndrico.

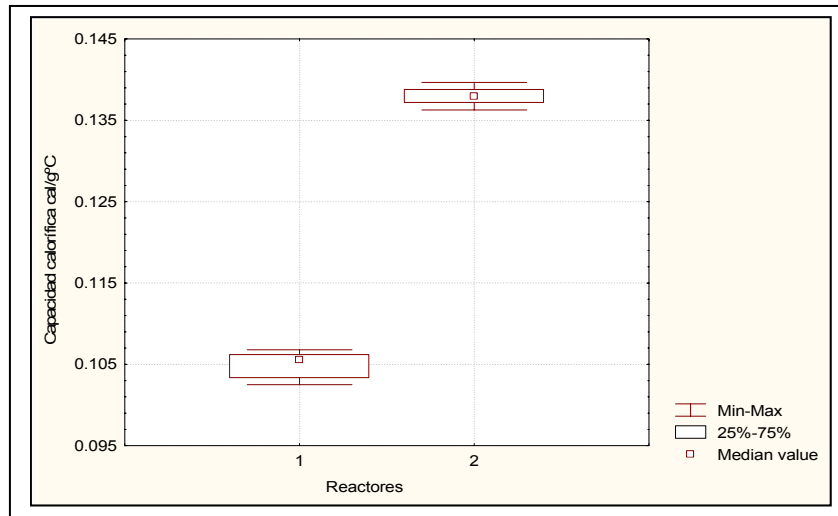


Gráfico 1. Capacidad calorífica del reactor cilíndrico (1) Vs. reactor rectangular (2)

El programa empleado en el diseño se llama Descriptive Statistics el cual realizó diferentes pruebas dentro de las cuales se encuentran t-student, análisis de varianza y coeficiente de variación en porcentaje, a los diferentes pares de datos en la determinación del c_p de los reactores, determinación de la precisión de los mismos, el calor de fusión, la conductividad térmica de los vidrios y de la yuca, y la determinación de la densidad aparente de los reactores.

Al aplicar una prueba de student para comparar ambos reactores se encontró que existen diferencias significativas entre los reactores con un 95% de confianza, deduciendo que dichos valores centrales pueden afectar la medición de c_p de la yuca. (Ver Anexo 3 No 30)

	Promedio	Promedio	t-valor	Grados de libertad	p-varianza
	G_1:1	G_2:2	-	8	1,01702E-09
CPTOTAL	0,11	0,14	31,8937038	8	09

Con los resultados obtenidos estadísticamente se puede observar que la capacidad calorífica del reactor rectangular es mayor que la capacidad calorífica del reactor cilíndrico, esto debido a que el acero inoxidable con el que fueron construidos no es del mismo calibre. Sin embargo al hacerle los ajustes con los demás componentes diferentes al acero, se pudo observar que el reactor cilíndrico presentó mayor estabilidad ya que el c_p no varió mientras que en el rectangular si.

3.2.4 Determinación de la precisión de los reactores

Para determinar la precisión de los reactores fue necesario hallar la capacidad calorífica experimental de una sustancia estable como la del agua para poder compararla con su valor teórico. Después de conocer dichos valores aplicamos la ecuación para determinar el porcentaje (%) de error.

$$\%Error = \frac{Teórico - Experimental}{Teórico} * 100$$

3.2.5 Reactor Cilíndrico

En el caso del reactor cilíndrico ya que es de tapa rosca no se tiene en cuenta el C_p del caucho.

$$m_{\text{reactor}} C_p \text{ reactor } (T_2 - T_1) + m_{\text{muestra de agua}} C_p \text{ muestra de agua } (T_2 - T_1) = m_{\text{agua}} C_p \text{ agua } (T_2 - T_1) + m_{\text{calorímetro}} C_p \text{ calorímetro } (T_2 - T_1)$$

$$399 \text{ g} * 0,10 \text{ cal/g } ^\circ \text{C} * (91,9 - 31,5) ^\circ \text{C} + 60,9 \text{ g} * c_p \text{ muestra de agua} * (91,9 - 31,5) ^\circ \text{C}$$

$$= 180 \text{ g} * c_p \text{ agua} * (31,5 - 18,2) ^\circ \text{C} + 47,4 \text{ g} * 0,22 \text{ cal/g } ^\circ \text{C} * (31,5 - 18,2) ^\circ \text{C}$$

$$c_p \text{ agua} = 0,98 \text{ cal / g } ^\circ \text{C}$$

$$\% \text{ Error}_{\text{reactor cilíndrico}} = 2$$

3.2.6 Reactor Rectangular

$$m_{\text{reactor}} C_{p \text{ reactor}} (T_2 - T_1) + m_{\text{muestra de agua}} C_{p \text{ muestra de agua}} (T_2 - T_1) = m_{\text{agua}} C_{p \text{ agua}} (T_2 - T_1) + m_{\text{calorímetro}} C_{p \text{ calorímetro}} (T_2 - T_1)$$

$$200 \text{ g} * 0,13 \text{ cal/g } ^\circ\text{C} * (92,1 - 30) ^\circ\text{C} + 51,1 \text{ g} * C_{p \text{ muestra de agua}} ^\circ\text{C} * (92,1 - 30) ^\circ\text{C} \\ = 200 \text{ g} * 1 \text{ cal/g } ^\circ\text{C} * (30 - 17,4) ^\circ\text{C} + 47,4 \text{ g} * 0,22 \text{ cal/g } ^\circ\text{C} * (30 - 17,4) ^\circ\text{C}$$

$$C_{p \text{ agua}} = 0,93 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$$

$$\% \text{Error}_{\text{reactor rectangular}} = 7$$

Las tablas de resultados iniciales sin tratamiento estadístico se encuentran en el Anexo 2.

El análisis descriptivo de los datos obtenidos presenta valores medios de la capacidad calorífica del agua de 0.98 cal/g °C (reactor cilíndrico) y 0.93 cal/g °C (reactor rectangular) con una dispersión de la información de 5.99% para el cilíndrico y 5.31% para el rectangular, mostrando que existen diferencias significativas.

Como se observa en el Grafico 2 la capacidad calorífica del agua en el reactor cilíndrico es mayor que la del rectangular.

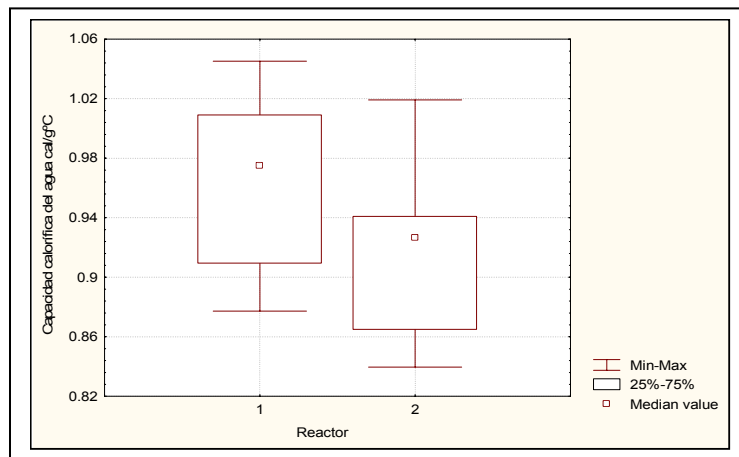


Gráfico 2. Capacidad calorífica del agua en el reactor cilíndrico (1) vs reactor rectangular (2).

Al aplicar la prueba de student para compararlos se encontró que existen diferencias significativas entre los datos de capacidad calorífica del agua en los dos reactores con un 95% de confianza. (Ver Anexos 3 No 31)

	Promedio	Promedio		Grados de libertad	p-varianza
	G_1:1	G_2:2	t-valor		
C _p total	0,96	0,92	2,81657214	38	0,0077

Al aplicar la fórmula de porcentaje de error para conocer la precisión de los reactores se encontró que el reactor cilíndrico tiene un porcentaje de error mas bajo (2%) que el del reactor rectangular (7%), lo que nos lleva a concluir que el reactor cilíndrico es el más preciso y confiable para posteriores mediciones.

3.2.7 Determinación de la k de las placas de vidrio contenedoras

Determinación experimental del la conductividad térmica de los vidrios

Para determinar la conductividad térmica del vidrio 1, es necesario establecer la cantidad de calor que se transmite, a través del sistema, aplicando la ecuación (13) descrita anteriormente se obtiene:

$$H = \frac{358,7 \text{ g} * 333 \text{ J} / \text{g}}{600 \text{ s}}$$

$$H = 199,07 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

Para la aplicación del modelo se requirió: ΔT como la variación de la temperatura de un punto al otro en $^{\circ}C$, E_1 el espesor vidrio 1 en m, H_1 el calor de fusión en J/s, A el área de transferencia de calor en m^2 y, la conductividad térmica de los vidrios en $W/m^{\circ}C$, aplicando la ecuación (3) descrita anteriormente se obtiene:

$$k_1 = \frac{0.003m * 199,07 \frac{J}{s}}{0,00785m^2 * (89 - 4)^{\circ}C}$$

$$k_1 = 0,89 \frac{W}{m^{\circ}C}$$

Para determinar la conductividad térmica del vidrio 3, es necesario establecer la cantidad de calor que se transmite, a través del sistema, aplicando la ecuación (13) descrita anteriormente y se obtiene:

$$H = \frac{338,70 g * 333 J / g}{600 s}$$

$$H = 187,97 \frac{J}{s}$$

Para la aplicación del modelo se requirió: ΔT como la variación de la temperatura de un punto al otro en $^{\circ}C$, E_1 el espesor vidrio 1 en m, H_1 el calor de fusión en J/s, A el área de transferencia de calor en m^2 y, la conductividad térmica de los vidrios en $W/m^{\circ}C$, aplicando la ecuación (5) descrita anteriormente se obtiene:

$$k_3 = \frac{0,003m * 187,97 \frac{J}{s}}{0,00849m^2 * (90 - 3)^{\circ}C}$$

$$k_3 = 0,76 \frac{W}{m^{\circ}C}$$

Las tablas de resultados iniciales sin tratamiento estadístico se encuentran en el Anexo 2.

En el análisis descriptivo de los datos se puede observar que hay mayor variación entre los datos de conductividad térmica del vidrio 1 (9,80%) que en los del vidrio 2 (4,32%), mostrando la posibilidad de que no existen diferencias significativas entre los dos vidrios.

Según el Gráfico 3, muestra que los valores centrales (0,78 del vidrio 1 y 0,80 del vidrio 2) de las dos placas de vidrios confirman que ambas placas son aptas para realizar los cálculos para la conductividad térmica de la yuca, ya que estos valores se encuentran dentro del rango teórico del vidrio comercial (0.7 – 1 W/m°C.)

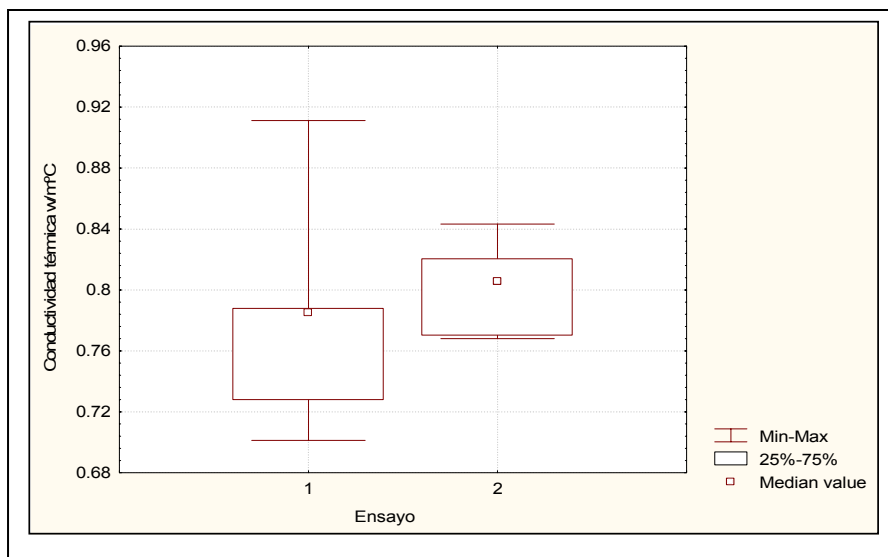


Gráfico 3. Conductividad térmica de las placas de vidrio 1 y 2

Al aplicar una prueba de student para comparar los vidrios se encontró que no existen diferencias significativas entre los vidrios con un 95% de confianza, deduciendo que no sesgan la medición de la k de la yuca. (Ver Anexo 3 No 29)

	Promedio	Promedio		Grados de	
	G_1:1	G_2:2	t-valor	Libertad	p - varianza
Conductividad	0,79	0,80	-0,43	8	0,68

Después de haber realizado los respectivos cálculos en los instrumentos de medición se muestra la tabla 6 con cada uno de los valores de las propiedades físicas y térmicas.

Tabla 6. Propiedades físicas y térmicas de los reactores y placas contendoras de vidrio.

Propiedades	Reactor cilíndrico	Reactor Rectangular	Vidrio 1	Vidrio 2
Densidad aparente (kg/m ³)	1,17	1,16	-	-
Conductividad térmica (W/m °C)	-	-	0,78	0,80
Capacidad calorífica (cal/g°C)	0,10	0,13	-	-

3.3 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES TÉRMICAS DE LA YUCA

En este numeral se describirá la preparación de las muestras y el procedimiento que siguió para hallar la capacidad calorífica y la conductividad térmica de la yuca, y a partir de ellos se obtuvo el valor de la difusividad térmica.

3.3.1 Preparación de las muestras

Se partió de las muestras de yuca en condiciones uniformes (espesor y forma) cuya composición se ilustra en la Tabla 7.

Tabla 7. Composición del producto de evaluación en g por cada 100g.

Componentes	Cantidad
Humedad (%)	61
Proteína (%)	2,6
Fibra cruda (%)	4,16
Grasa (%)	0,42
Cenizas (%)	1,91
Carbohidratos (%)	30,44

Corte de las muestras

Se retiró la cáscara de la yuca y se cortó la yuca longitudinal y transversalmente en rodajas de 2 mm de espesor aproximadamente, mediante el uso de la Tajadora de discos (Marca Java Modelo C –280 Eléctrica monofásica 110 Voltios) de la planta de carnes de la ULS, para la determinación de la capacidad calorífica, y el corte longitudinal en la determinación de la conductividad térmica como se observa en la figura 14.



Figura 14. Tajadora de discos para corte de láminas de yuca en dirección transversal y longitudinal

Ensamble de las muestras para c_p

Para realizar la medición de la capacidad calorífica de la yuca se troquelaron las muestras de yuca con ayuda de un molde del diámetro igual para el reactor cilíndrico y, un marco con las medidas del reactor rectangular con el fin de eliminar espacios entre la muestra y las paredes de los reactores.

Ensamble de las muestras para k

Para realizar la medición de la conductividad térmica de la yuca se troquelaron las muestras de yuca con las siguientes medidas; 4,4 cm de largo x 3,0 cm. de ancho, con el fin de reducir espacios entre las dos placas de vidrio contenedoras.

3.3.2 Determinación de c_p

3.3.3 Reactor Cilíndrico

$$m_{\text{sistema}} C_p \text{sistema} (T_2 - T_1) + m_{\text{yuca}} C_p \text{yuca} (T_2 - T_1) = m_{\text{agua}} C_p \text{agua} (T_2 - T_1) + m_{\text{calorímetro}} C_p \text{calorímetro} (T_2 - T_1)$$
$$200 \text{ g} * 0,10 \text{ cal/g } ^\circ \text{C} * (91,7 - 35,4) ^\circ \text{C} + 50,6 \text{ g} * C_p \text{yuca} (91,7 - 35,4) ^\circ \text{C} = 200 \text{ g} * 1 \text{ cal/g } ^\circ \text{C} * (35,4 - 16,8) ^\circ \text{C} + 47,4 \text{ g} * 0,22 \text{ cal/g } ^\circ \text{C} * (35,4 - 16,8) ^\circ \text{C}$$
$$C_p \text{yuca} = 0,45 \text{ cal /g } ^\circ \text{C}$$

3.3.1 Reactor Rectangular

$$m_{\text{sistema}} C_p \text{sistema} (T_2 - T_1) + m_{\text{yuca}} C_p \text{yuca} (T_2 - T_1) = m_{\text{agua}} C_p \text{agua} (T_2 - T_1) + m_{\text{calorímetro}} C_p \text{calorímetro} (T_2 - T_1)$$
$$200 \text{ g} * 0,13 \text{ cal/g } ^\circ \text{C} * (92,1 - 30,5) ^\circ \text{C} + 30,5 \text{ g} * C_p \text{yuca} (92,1 - 30,5) ^\circ \text{C} = 200 \text{ g} * 1 \text{ cal/g } ^\circ \text{C} * (30,5 - 17,4) ^\circ \text{C} + 47,4 \text{ g} * 0,22 \text{ cal/g } ^\circ \text{C} * (30,5 - 17,4) ^\circ \text{C}$$
$$C_p \text{yuca} = 0,55 \text{ cal /g } ^\circ \text{C}$$

Las tablas de resultados iniciales sin tratamiento estadístico se encuentran en el Anexo 2.

El análisis descriptivo de los datos obtenidos presentó valores medios de la capacidad calorífica de 0.54 cal/g °C en el reactor cilíndrico y de 0.44 cal/g °C en el rectangular con una dispersión de la información de 8,77% para el cilíndrico y 13,60% para el rectangular, mostrando la posibilidad de diferencias significativas entre los reactores por la forma. (Ver Anexo 3 No 30)

En el Gráfico 4 se observa que el valor mínimo del reactor cilíndrico (1) concuerda con el máximo del reactor rectangular (2), lo que indica que los valores centrales son diferentes para cada uno de los reactores.

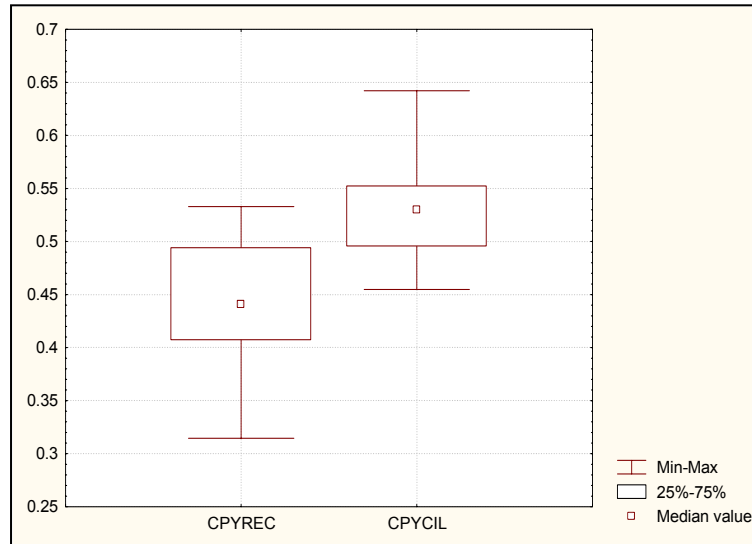


Gráfico 4. Capacidad calorífica de la yuca en los reactores cilíndrico (1) y rectangular (2).

Al aplicar una prueba de student para compararlos se encontró que existen diferencias significativas entre los reactores con un 95% de confianza, mostrando que la forma del reactor incide en la transferencia de calor, la homogeneidad del material y valor del c_p de la yuca. (Ver Anexo 3 No 30)

	Promedio				
	G_1:1	G_2:2	t-valor	Grados de libertad	p-varianza
CPYUCA	0,44	0,54	5,52643397	38	2,54017E-06

La diferencia que se presenta entre los valores medios del reactor cilíndrico (0,53 cal/g °C) y del reactor rectangular (0,38 cal/g °C) se debe a que el valor del c_p en el reactor cilíndrico es mayor que el reactor rectangular, y además en la determinación de la precisión de dichos reactores se comprueba que el reactor cilíndrico es mas confiable que el rectangular.

3.3.4 Determinación del k de la yuca

Para determinar la conductividad térmica de la yuca, es necesario establecer la cantidad de calor que se transmite, a través del sistema, aplicando la ecuación (13) se obtiene:

$$H = \frac{56,07 \text{ g} * 333 \text{ J} / \text{g}}{600 \text{ s}}$$

$$H = 31,30 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

Para la aplicación del modelo se requirió: ΔT ; Variación de temperatura de un punto al otro ($^{\circ}\text{C}$), E_1 : Espesor vidrio 1 (m), E_2 : Espesor muestra (m), E_3 : Espesor vidrio 2 (m), H: calor de fusión (J/s), A: área de transferencia de calor (m^2) y k: conductividad térmica de los vidrios ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$), aplicando la ecuación (12) se obtiene:

$$k_2 = \frac{E_2}{\left[\frac{\Delta T * A}{H} - \left[\frac{E_1}{k_1} + \frac{E_2}{k_2} \right] \right]}$$

$$k_2 = \left[\frac{0,03}{\left[\frac{(91-5) * 0,0095}{31,30} - \left[\frac{0,03}{0,77} + \frac{0,03}{0,78} \right] \right]} \right]$$

$$k_2 = 0,16 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}}$$

Las tablas de resultados iniciales sin tratamiento estadístico se encuentran en el Anexo 2.

Como se muestra en el Gráfico 5 existe un valor máximo demasiado disperso en las 20 repeticiones en el equipo Thermicon pero dicho valor no afecta la medición central en la conductividad térmica de la yuca, ya que el 75% de los valores entre el cajón y el valor mínimo son más representativos. (Ver Anexo 3 No 29)

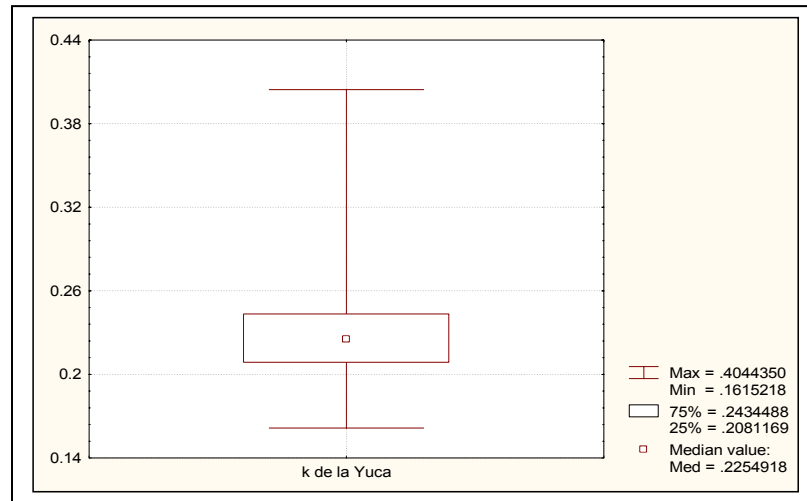


Gráfico 5. Conductividad térmica de la yuca experimental.

El valor medio del k de la yuca determinado por el análisis estadístico es 0,23 W/m °C. (Ver Anexo 3 No 29)

3.3.5 Determinación matemática de la difusividad térmica

Para determinar la difusividad es necesario conocer los valores de la densidad aparente en los reactores rectangular y cilíndrico siendo sometidos al tratamiento estadístico respectivo como a continuación se mostrará, después con el valor de la conductividad térmica de la yuca y las capacidad caloríficas de la yuca procedemos a utilizar la ecuación 35.

3.3.5.1 Determinación de la densidad aparente en los reactores

Se realizaron 20 mediciones de la densidad aparente en los reactores cilíndrico y rectangular a partir de la cantidad de producto que caben en los reactores y su respectivo volumen.

El tratamiento estadístico realizado a la densidad aparente muestra que existen diferencias significativas del 5% entre los datos, al aplicar el p-varianza el porcentaje de error es 0,039 siendo menor que 0.05. Como se observa en el Gráfico 6 el valor de la densidad aparente en el reactor cilíndrico es mayor ($1,19 \text{ kg/m}^3$) que el del reactor rectangular ($1,16 \text{ kg/m}^3$). (Ver Anexo 3 No 31)

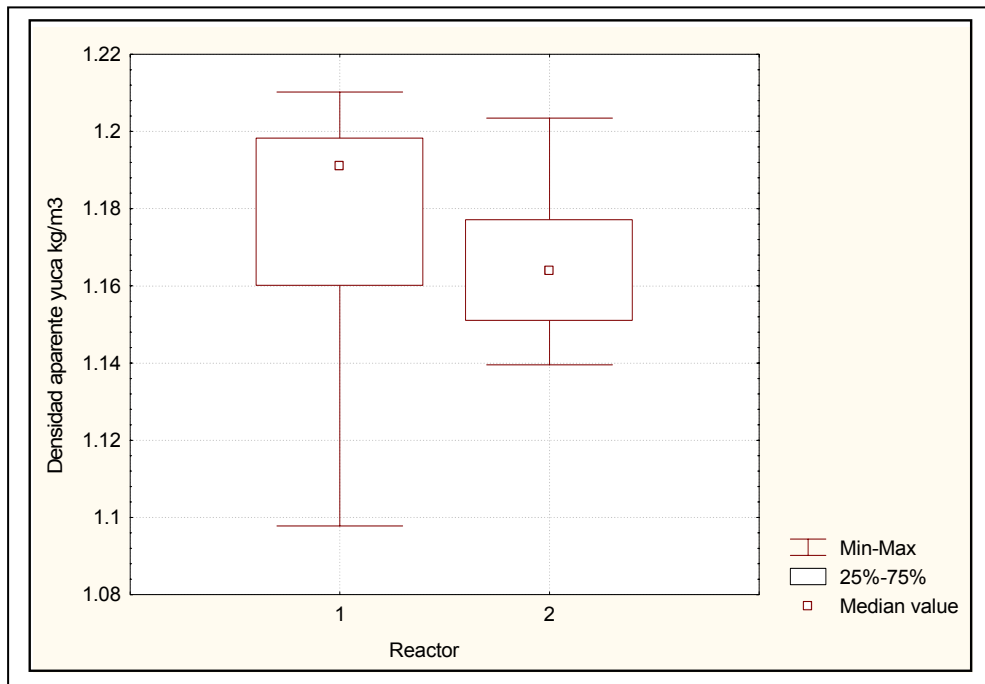


Gráfico 6. Densidad aparente en kg/m^3 de la yuca en los reactores cilíndrico (1) y rectangular (2)

Las tablas de resultados iniciales sin tratamiento estadístico se encuentran en el Anexo 2.

Determinación de la α

Para determinar la difusividad térmica es necesario emplear; ρ la densidad aparente de la yuca en los reactores en kg/m^3 , c_p la capacidad calorífica experimental de la yuca en $\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$ en los dos reactores, y k la conductividad térmica de la yuca en $\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$, después de ser sometido al tratamiento estadístico descriptivo correspondiente y basándonos en la ecuación 35, se obtuvo:

$$\alpha = \frac{k_{yuca}}{\rho_{aparente\ reactor\ cilindrico} * c_{p\ reactor\ cilindrico}}$$

$$\alpha = \frac{k_{yuca}}{\rho_{aparente\ reactor\ rec\ tan\ gular} * c_{p\ reactor\ rec\ tan\ gular}}$$

$$\alpha_{reactorcilindrico} = \frac{0,23 \frac{W}{m^\circ C}}{2218,05 \frac{J}{kg^\circ C} * 1,19 * 10^{-3} \frac{m^2}{s}}$$

$$\alpha = 0,087 \frac{m^2}{s}$$

$$\alpha_{reactor\ rec\ tan\ gular} = \frac{0,23 \frac{W}{m^\circ C}}{1590,31 \frac{J}{kg^\circ C} * 1,16 * 10^{-3} \frac{kg}{m^3}}$$

$$\alpha = 0,12 \frac{m^2}{s}$$

Se determinaron dos valores de difusividad térmica ya que el valor de la capacidad calorífica fue determinado para los reactores cilíndrico y rectangular, estos valores presentan una diferencia debido a que el valor del c_p de la yuca del reactor cilíndrico es mayor que el rectangular siempre. Dado que la precisión del reactor cilíndrico es la más confiable se tomó el dato de difusividad del mismo ($0.087 \text{ m}^2/\text{s}$).

3.4 APLICACIÓN DE MODELOS PREDICTIVOS Y EXPERIMENTALES

En este numeral se presentará la tabla de resultados al aplicar los modelos predictivos para el c_p y el k , y la difusividad por método matemático respectivamente.

Tabla 8. Valores de las propiedades térmicas de la yuca de los modelos predictivos y experimental, donde ^a es el valor de la difusividad térmica en función de c_p del reactor cilíndrico y ^b en función del reactor rectangular.

Modelos	Capacidad calorífica (cal/g °C)	Conductividad térmica (W/m °C)	Difusividad térmica (m ² /s)
Dickerson	0,74	-	-
Negrete UPV	0,75 a 20 °C	-	-
Siebel			
c_p fresco	0,68	-	-
c_p congelado	0,38		
Sweat			
Frutas y vegetales	-	0,44	-
Pescado	-	0,23	-
Componentes	-	0,43	-
Negrete en función de k	-	0,49	$1,47 \cdot 10^{-7}$
Negrete en función de c_p	-	-	$1,28 \cdot 10^{-7}$
Thermicon	-	0.23	-
Reactor cilíndrico	0.54	-	^a 0,087
Reactor rectangular	0.44	-	^b 0,12

3.4.1 Comparativo teórico Vs experimental

3.4.1.1 Reactor cilíndrico

A partir de los valores obtenidos experimentalmente se compararon contra el modelo matemático de Negrete (UPV) a la misma temperatura. En la siguiente tabla (9) se muestran dichos resultados.

Tabla 9. Valores obtenidos para la capacidad calorífica de la yuca en el reactor cilíndrico expresada en cal/g°C por experimentación y aplicando modelo predictivo^(a)

Temperatura (°C)	Valores experimental	Valores modelo UPV
34.9	0.49	0.76014
35.4	0.46	0.76015
35.7	0.51	0.76016
36.2	0.51	0.76017
36.3	0.52	0.76018
36.4	0.51	0.76019
36.6	0.53	0.76020
36.8	0.55	0.76022
36.9	0.53	0.76023
37	0.56	0.76024
37.6	0.52	0.76025
38	0.61	0.76026
38.3	0.55	0.76028
38.4	0.54	0.76029
38.7	0.62	0.76030
41.7	0.64	0.76031

^a Negrete, Universidad Politécnica de Valencia

En el anexo 6.1 se encuentran las graficas con una regresión Reciprocal Quadratic de 0.86 para el experimental y 0.97 para el del modelo teórico UPV, estas graficas fueron elaboradas con el programa Curve Expert 1.3.

3.4.1.2 Reactor rectangular

A partir de los valores obtenidos experimentalmente se compararon contra el modelo matemático de Negrete (UPV) a la misma temperatura. En la siguiente tabla (10) se muestran dichos resultados.

Tabla 10. Valores obtenidos para la capacidad calorífica de la yuca en el reactor rectangular expresada en cal/g°C por experimentación y aplicando modelo predictivo^(a)

Temperatura (°C)	Valor experimental	Valor modelo UPV
28.7	0.31	0.8015
29.4	0.32	0.8015
29.5	0.43	0.8016
29.6	0.42	0.8016
29.7	0.45	0.8016
29.8	0.42	0.8016
29.9	0.53	0.8017
30	0.45	0.8017
30.1	0.51	0.8017
30.2	0.50	0.8017

^a Negrete, Universidad Politécnica de Valencia

En el anexo 6.2 se encuentran las graficas con una regresión 3rd degree Polynomial Fit de 0.89 para el experimental y 0.94 para el del modelo teórico UPV, estas graficas fueron elaboradas con el programa Curve Expert 1.3.

3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el desarrollo de este trabajo se estableció un diseño experimental por variables independientes para cada propiedad térmica.

Para el número de repeticiones se establecieron 20 en la etapa experimental, con el fin de disminuir el porcentaje de error y para establecer niveles de variación en

las propiedades térmicas mediante aplicación de estadística descriptiva básica y análisis de varianza.

Las tablas de resultados del análisis estadístico se encuentran en el Anexo 3.

4 CONCLUSIONES

En el trabajo de investigación que se realizó para la yuca blanca chiroza se alcanzaron satisfactoriamente los objetivos generales y específicos propuestos por lo investigadores, aunque se presentaron algunas dificultades de orden técnico, por ejemplo; en la medición de la temperatura con la termocupla para determinar la capacidad calorífica de los reactores, agua y yuca, algunas medidas afectadas por estado del medio ambiente para la dos propiedades térmicas, y la no existencia de un calorímetro en la sede La Floresta.

Se diseñaron y construyeron dos reactores; rectangular y cilíndrico para determinar la capacidad calorífica según cortes; longitudinal y transversal en la yuca determinando que el reactor cilíndrico es más preciso y confiable en las mediciones realizadas por su material de construcción, forma y cierre de tapa rosca.

Una parte fundamental de la investigación para la toma de mediciones exactas en la capacidad calorífica de la yuca se fundamenta en la determinación de la precisión de los reactores durante la medición del c_p del agua, dando un porcentaje de error muy bajo (2%) y aceptable para dicha medición, considerándolos aptos para hallar el c_p del producto de estudio.

Se construyó un equipo prototipo de conductividad térmica llamado **Thermicon**, basado en el Aparato de Conductividad Térmica Modelo TD-8561, el cual también nos proporcionó realizar mediciones de la conductividad térmica de uno de sus componentes (placas de vidrio contenedoras) para ser más precisa la medición de la propiedad térmica de la yuca.

A partir de los datos obtenidos experimentalmente de las propiedades térmicas del producto (capacidad calorífica de **0,54 cal/g °C**, conductividad térmica de **0,23 W/m °C** y difusividad térmica de **0.087m²/s**) se realizó una comparación con los modelos matemáticos predictivos, con lo cual se concluyó que los datos experimentales son mas confiables que los obtenidos en los modelos predictivos, ya que estos últimos fueron diseñados para materiales homogéneos, y los componentes de los alimentos son cambiantes.

Se elaboraron dos guías prácticas (una para la capacidad calorífica y otra para la conductividad térmica) junto con sus equipos y herramientas de medición y calibración que permitieron determinar las propiedades térmicas de la yuca y las de otras sustancias como las del agua.

5 RECOMENDACIONES

Con las guías prácticas desarrolladas y el material correspondiente durante este trabajo se puede dar inicio a la construcción de las tablas de los alimentos ya que los modelos matemáticos predictivos consideran los componentes de los alimentos (proteína, fibra, humedad, sólidos, etcétera) como compuestos homogéneos.

Fomentar alianzas estratégicas entre las facultades de Ingeniería de Alimentos y Diseño y Automatización Electrónica para la construcción de equipos y medidas.

Revisar en profundidad a manera de seminario de investigación los procesos que ocurren durante la cocción (en inmersión y al vapor, entre otros) de los alimentos.

Incentivar la enseñanza en el pregrado el diseño de equipos propios de la facultad para la determinación de variables físicas y de alimentos.

Abrir un seminario permanente en los procesos de transferencia de calor y, métodos de las diferentes soluciones a las ecuaciones que se generan en tales procesos ya que se continúa con la línea de investigación en la Facultad de Ingeniería de Alimentos.

BIBLIOGRAFÍA

ALBA, Oscar Andrés y MURILLO, Diego Fernando. Evaluación de variables y transferencia de calor en los procesos de cocción en inmersión y al vapor en la papa R-12, yuca blanca Chiroza y plátano hartón en sus dos estados de madurez. Bogotá, 2003. Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería de Alimentos. Área de alimentos, p 66-67

Çengel, Yunus A y Boles Michael A. Termodinámica. Madrid (España). 2^{da} ed. Mac Graw Hill, p 127-130.

Francisco Moose. Calor. Disponible en Internet; <http://www.alipso.com/calor>.

FLOREZ, Ethel Soraya y ARARAT, Alfredo Enrique. Conservación y utilización de la yuca (*Manihot esculenta* M) en frituras de comida rápida costeña. Bogotá, 1996. Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería de Alimentos. Área de alimentos, p 16, 17 y 22.

GNU. Densidad. Disponible en Internet; <http://www.wikipedia.com>

GONZALEZ, Ana Maria. Morfología de plantas vasculares. Facultad de Ciencias Agrarias. Sgto Cabral 2131. Universidad Nacional del Nordeste. Corrientes, Argentina. 2004. Disponible en Internet: <http://www.biologia.edu.ar/botanica>

Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (I.C.B.F). Tabla de Composición de Alimentos Colombianos. Bogotá, 1990.

KARLEKAR, B V. Transferencia de calor. Mac Graw Hill. México D.F. 1995, p 9.

LEWIS, M J. Propiedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado. Acibia. Zaragoza (España), 1993, p 235-237.

MUÑOZ VERA, Juan Carlos. Determinación de la difusividad térmica en pasta de Murta (*Ugni molinae turcz*), en función de la temperatura. Valdivia, 2002. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ingeniería de Alimentos. Área de alimentos, p 21-22.

NEGRETTE C; VALDIVIA C & ZUÑIGA R. Programa para el cálculo de las propiedades termodinámicas de los alimentos chilenos. Disponible en Internet; <http://www.upv.es/dtalim/herraweb.htm>. III taller.

ORREGO, Carlos E. PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS. Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales. 2004. Disponible en Internet: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4070035/index.html>

OSPINA, Bernardo. La yuca en el tercer milenio. Sistemas modernos de producción, utilización y comercialización. CIAT, 2002, p 17-24.

OWEN, Fennema. Química de los alimentos. 2^{da} Ed. Acribia. Zaragoza (España), 2000, p 221, 228-237.

SERWAY, A Raymond. Física para ciencias e ingeniería. 5^{ta} Ed. Mac Graw Hill. Ciudad de México (México), 2001, p 602-629.

SINGH, Paul. Introducción a la ingeniería de los alimentos. Acribia. Zaragoza (España), 1990. p 153-162.

SIN AUTOR. Guía de laboratorio Física III "Calor Específico de Sólidos". Universidad de la Salle. 1990

ANEXO 15. CÁLCULOS PARA DETERMINAR LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LOS VIDRIOS

Calor de fusión del Vidrio 1

No de Pruebas	Calculado	Teórico	Teórico	Teórico	Teórico
	Calor (J / s)	Masa de hielo fundido (g)	Calor latente de fusión(J / g)	Tiempo de la prueba (s)	Diametro del hielo (m)
1	199,08	358,7	333	600	0,1
2	193,53	348,7	333	600	0,105
3	187,98	338,7	333	600	0,105
4	179,65	323,7	333	600	0,107
5	193,53	348,7	333	600	0,104

Conductividad Térmica del Vidrio 1

Conductividad	Calculado	Teórico	Calculado	Teórico	Teórico
	Calor (J / s)	Espesor del vidrio 1(m)	Área de contacto (m ²)	Temp del hielo (°C)	Temp del vapor (°C)
0,90	199,08	0,003	0,00785	4	89
0,76	194,69	0,003	0,00865	2	90
0,75	189,11	0,003	0,00865	3	90
0,70	180,73	0,003	0,00899	4	90
0,78	194,69	0,003	0,00849	2	90

Calor de Fusión del Vidrio 2

No de Pruebas	Calculado	Teórico	Teórico	Teórico	Teórico
	Calor (J / s)	Masa de hielo fundido (g)	Calor latente de fusión (J / g)	Tiempo de la prueba (s)	Diametro del hielo (m)
1	187,98	338,7	333	600	0,104
2	196,30	353,7	333	600	0,105
3	196,30	353,7	333	600	0,102
4	182,43	328,7	333	600	0,1
5	187,98	338,7	333	600	0,105

Conductividad Térmica del Vidrio 2

Conductividad	Calculado	Teórico	Calculado	Teórico	Teórico
	Calor (J / s)	Espesor del vidrio 2 (m)	Área de contacto (m ²)	Temp del hielo (°C)	Temp del vapor (°C)
0,77	189,11	0,003	0,00849	3	90
0,78	197,48	0,003	0,00865	2	90
0,84	197,48	0,003	0,00817	4	90
0,80	183,52	0,003	0,00785	2	90
0,75	189,11	0,003	0,00865	3	90

ANEXO 18. CÁLCULOS DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LA YUCA

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EXPERIMENTAL DE LA YUCA

No de Pruebas	A * ΔT / Q	L1/K1	L3 /K3	L2	K de la yuca
1	0,026	0,0039	0,0038	0,003	0,16
2	0,015	0,0039	0,0038	0,003	0,39
3	0,022	0,0039	0,0038	0,003	0,21
4	0,015	0,0039	0,0038	0,003	0,41
5	0,021	0,0039	0,0038	0,003	0,23
6	0,021	0,0039	0,0038	0,003	0,23
7	0,020	0,0039	0,0038	0,003	0,25
8	0,025	0,0039	0,0038	0,003	0,18
9	0,021	0,0039	0,0038	0,003	0,22
10	0,020	0,0039	0,0038	0,003	0,24
11	0,022	0,0039	0,0038	0,003	0,21
12	0,020	0,0039	0,0038	0,003	0,25
13	0,023	0,0039	0,0038	0,003	0,19
14	0,020	0,0039	0,0038	0,003	0,24
15	0,022	0,0039	0,0038	0,003	0,21
16	0,021	0,0039	0,0038	0,003	0,23
17	0,021	0,0039	0,0038	0,003	0,22
18	0,020	0,0039	0,0038	0,003	0,25
19	0,021	0,0039	0,0038	0,003	0,23
20	0,022	0,0039	0,0038	0,003	0,21

ANEXO 19. CÁLCULOS DE CAPACIDAD CALORIFICA DE LOS REACTORES

REACTOR CILINDRICO

REACTOR RECTANGULAR

Prueba No.	1	2	3	4	5	Prueba No.	1	2	3	4	5
Cp agua (cal/g ° C)	1	1	1	1	1	Cp agua	1	1	1	1	1
W calorimetro (g)	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	W calorimetro (g)	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4
Cp calorimetro (cal/g ° C)	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	Cp calorimetro	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
W aire (g)	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	Cp caucho	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062
Cp aire (cal/g ° C)	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	W caja (g)	200	200	200	200	200
W reactor (g)	399	399	399	399	399	Vol. Agua ml.	200	200	200	200	200
W Hilo (g)	2	2	2	2	2	W caucho (g)	0,207	0,207	0,207	0,207	0,207
Cp Hilo (cal/g°C)	0,324	0,324	0,324	0,324	0,324	W aire (g)	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059
W silicona (g)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	Cp aire (cal/g ° C)	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
Cp silicona (cal/g°C)	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	W Hilo (g)	2	2	2	2	2
Vol. Agua ml.	180	180	180	180	180	Cp Hilo (cal/g°C)	0,324	0,324	0,324	0,324	0,324
Temp Agua Calorimetro(°C)	18,2	18,1	17,7	18,2	18,3	Temp Agua (°C)	16,5	16,6	17,2	17,3	17,3
Temp Material (°C)	91,9	92	92,1	92	92,1	Temp Material (°C)	91,7	91,7	91,6	91,6	91,6
Temp final prueba (°C)	31,5	32,1	28,8	31,7	31,8	Temp final prueba (°C)	25,4	25,4	26,1	26,1	26,1

Tiempo en Minutos	°C	°C	°C	°C	°C	Tiempo en Minutos	°C	°C	°C	°C	°C
1	26,7	29,9	22,9	26,4	26,1	1	21,6	21,2	21,7	24,3	24,2
2	30,6	30,9	27	27,4	28,4	2	24,1	21,9	23,7	24,7	24,9
3	31,6	32	28,1	30,7	28,7	3	25,1	22,8	24,9	25,2	24,9
4	31,4	32,1	28,6	31,7	30,1	4	25,4	24,1	25,5	25,2	25
5	31,5	32,3	28,6	31,4	30,8	5	25,4	25,3	25,8	25,3	25
6	31,5	32,1	28,8	31,6	31,4	6	25,5	25,3	25,8	25,7	25
7	31,5	32,1	28,8	31,7	31,5	7	25,4	25,4	26	25,9	25
8	31,5	32,1	28,8	31,7	31,8	8	25,4	25,4	26,1	26,1	25,4
9	31,5	32	28,8	31,7	31,8	9	25,5	25,4	26,1	26,1	25,5
10	31,5	31,8	29,9	31,7	31,8	10	25,4	25,4	26	26,1	26,1
11	31,5	31,8	30	31,6	31,8	11	25,3	25,4	25,9	26	26,1
12	31,4	31,5	30	31,3	31,6	12	25,3	25,3	25,9	26	26,1
13	31,4	31,4	30	31,3	31,6	13	25,2	25,3	25,8	25,9	26
14	31,4	31,4	29,8	31,2	31,5	14	25,2	25,3	25,8	26	25,9
15	31,4	31,4	29,7	31,1	31,4	15	25,3	25,3	25,8	26	25,9

Cp del Reactor	0,10	0,11	0,09	0,10	0,10	Cp del Reactor	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
----------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	----------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

ANEXO 21. CÁLCULOS PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS REACTORES CON AGUA DE-IONIZADA

DETERMINACION DE Cp DEL AGUA EN EL REACTOR CILINDRICO

Prueba No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Cp agua (cal/g°C)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
W calorimetro (g)	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9
Cp calorimetro(cal/g°C)	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Cp del reactor(cal/g°C)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
W del reactor (g)	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399
W de la muestra (agua g)	60,9	60,8	60,9	60,9	60,9	60,8	60,9	60,8	60,9	60,9	60,9	60,8	60,9	60,9	60,9	60,9	60,9	60,8	60,9	60,8	60,8
Vol. Agua ml.	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Temp Agua (°C)	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Temp Material (°C)	90	90	90	89	90	91	90	91	91	89	90	91	89	90	90	90	91	90	91	90	90

TIEMPO (min)	T(°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)
1	40	40	41	40	40	40	40	39	40	40	40	41	38	39	40	40	38	40	40	40	40
2	40	41	41	40	41	40	41	40	41	40	41	41	39	40	41	40	39	40	40	40	40
3	41	41	42	41	41	41	41	41	41	41	41	42	40	41	41	41	40	41	41	41	41
4	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	41	42	42	42	41	42	42	42	42
5	42	42	43	42	42	42	42	42	42	42	42	43	42	42	42	42	42	42	42	42	42
6	43	42	43	43	42	43	42	42	42	42	43	42	43	43	42	42	43	43	43	43	43
7	43	42	43	43	42	43	42	42	42	42	43	42	43	43	42	42	43	43	43	43	43
8	43	42	43	43	42	43	42	42	42	42	43	42	43	43	42	42	43	43	43	43	43
9	42	42	43	42	42	42	42	42	42	42	42	43	43	42	42	42	42	43	42	42	42
10	42	42	42	42	42	42	42	41	42	42	42	42	43	41	42	42	43	42	42	42	42
11	42	41	42	42	41	42	41	41	41	42	41	42	42	41	41	42	42	42	42	42	42
12	41	41	42	41	41	41	41	41	41	41	41	42	42	41	41	41	42	41	41	41	41
13	41	41	42	41	41	41	41	41	41	41	41	42	42	41	41	41	42	41	41	41	41
14	41	41	42	41	41	41	41	40	41	41	41	42	42	40	41	41	42	41	41	41	41
15	41	41	42	41	41	41	41	40	41	41	41	42	42	40	41	41	42	41	41	41	41

Cp	1,01	0,91	1,01	1,05	0,91	0,98	0,91	0,88	0,88	1,05	0,91	0,98	1,05	0,91	0,91	1,01	0,97	1,01	0,97	1,01
-----------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

ANEXO 23. CÁLCULOS PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD CALORIFICA DE LA YUCA

**CORTE LONGITUDINAL DE LA YUCA
CONTENEDOR RECTANGULAR**

Prueba No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Cp agua	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
W calorimetro (g)	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4
Cp calorimetro	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Cp recipiente	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Cp caucho	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062
W caucho (g)	0,2078	0,2078	0,2078	0,2078	0,2078	0,2078	0,2078	0,2078	0,2078	0,2078	0,2078	0,2078	0,2078	0,2078	0,2078	0,2078	0,2078	0,2078	0,2078	0,2078
W caja (g)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
W yuca (g)	30,5	31,4	31,3	30,3	31	30,7	32	31,2	30,6	30,8	30,8	30,4	31	31,3	30,9	31,3	30,7	31,2	30,6	31,4
Vol. Agua ml.	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Temp Agua (°C)	17,4	18,4	17,6	18,4	18,4	18,1	17,7	18,3	18	18,1	17,5	17,9	18	17,9	18,4	18,1	18,4	18,3	18	17,9
Temp Material (°C)	92,1	92,1	91,8	92,1	91,6	91,1	92,1	92	91	91,1	92	91,6	91,6	91,7	91,4	91,9	92,1	92	92	91,8
No de láminas	17	17	17	18	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Espesor láminas (mm)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Tiempo en Minutos	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
1	24,3	29,4	27,9	29,1	24,3	24,9	24,3	28,8	23,4	24,5	24,4	27,9	24,8	23,4	25,8	25,2	26,9	28,9	24,8	25,3
2	28,3	30	28,1	29,4	25,7	26,8	26	29,2	25,9	26,4	28,4	28	25	24,5	26	26,1	27,3	29,3	27,1	26,5
3	29,2	30	28,6	29,4	28,5	27,7	29,2	29,9	26,9	27,7	29,2	28,5	25,7	24,8	26,2	26,5	28	30	27,9	27,1
4	29,6	30	28,6	29,4	29,8	28,4	29,4	30	28	28,5	29,5	28,8	27	25,2	27,9	27,2	28,5	30,1	28,5	27,8
5	29,6	30	28,6	29,4	29,8	28,8	30	30	28,8	28,8	29,6	29,1	27,8	25,7	28,5	28,1	29	30,1	29,1	29,3
6	29,7	30	28,7	29,4	29,8	29,3	30,1	30	29,3	29,4	29,6	29,4	28,2	26,3	29,4	28,7	29,1	30,2	29,5	29,6
7	29,9	30	28,7	29,3	29,8	29,3	30,1	30	29,3	29,3	29,7	29,8	28,8	26,9	29,5	29,4	29,4	30,2	29,9	29,8
8	29,9	29,9	28,7	29,2	29,9	29,5	30,1	30	29,5	29,5	29,9	30	29,2	28,4	29,8	29,7	29,4	30,2	29,9	30
9	30	29,9	28,7	29,3	30	29,5	30,2	29,9	29,5	29,5	29,9	30,1	29,4	28,9	29,8	29,9	29,4	30,2	30,1	30
10	30	29,9	28,7	29,2	30	29,6	30,2	29,9	29,6	29,6	30	30,1	29,7	29,2	29,8	29,9	29,8	30,2	30,1	30
11	30	29,9	28,6	29,3	30	29,6	30,2	29,9	29,6	29,6	30	30,1	30,1	29,7	29,8	29,9	29,8	30,1	30,1	30
12	29,9	29,8	28,6	29,2	30	29,6	30,2	29,9	29,5	29,6	30	30	30,1	29,7	29,8	29,9	29,8	30,1	30,1	29,9
13	29,9	29,8	28,5	29,2	29,9	29,6	30,2	29,8	29,4	29,6	30	30	30,1	29,7	29,7	29,6	29,7	30,1	29,9	29,9
14	29,7	29,8	28,4	29,1	29,9	29,5	30,2	29,8	29,3	29,6	30	29,9	30,1	29,7	29,7	29,6	29,7	30	29,9	29,8
15	29,7	29,8	28,4	29,1	29,8	29,5	30,1	29,8	29,2	29,6	29,9	29,9	30	29,6	29,7	29,5	29,7	30	29,8	29,8
Calculado																				
Cp de la yuca	0,55	0,42	0,35	0,36	0,44	0,43	0,52	0,44	0,45	0,43	0,53	0,52	0,50	0,45	0,42	0,45	0,41	0,47	0,49	0,48

ANEXO 23. CÁLCULOS PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD CALORIFICA DE LA YUCA

**CORTE TRANSVERSAL DE LA YUCA
CONTENEDOR CILINDRICO**

Prueba No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Cp agua	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
W calorimetro (g)	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4
Cp calorimetro	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Cp recipiente	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
W cilindro (g)	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399
W yuca (g)	50,6	49,3	45,9	48,46	50	50,4	48,8	48,2	48,4	48,5	50,1	49,9	49,7	48,9	48,7	49,9	50,1	50,3	50	50,2	50,2
Vol. Agua ml.	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
T Agua (°C)	16,8	17,4	16	17,8	17,9	16,7	16,9	17	19	17,7	16,5	17,5	19	17,7	19,1	16,5	16,9	17	17,3	16,8	16,8
T Material (°C)	91,7	92	92,4	97,6	92,3	93,2	94,2	101,8	102,6	97,5	91,4	92,1	91,5	92,5	92	91,9	92,4	91,8	92	91,7	91,7
No de rodajas	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Espesor láminas (mm)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Minutos	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
1	33,2	33,6	32,7	34	34,1	35	29,4	35,4	33	35,1	33,3	33,6	34	35,1	35,4	33,5	33,7	34,3	34,7	33,6	33,6
2	34	35,1	34,2	38,3	36,6	35,7	32,9	37,9	39,1	35,7	34,1	35,2	37,2	35,8	36,8	33,9	35,4	35,2	35,3	35,2	35,2
3	35,4	35,8	34,5	38,3	37,7	36,2	35,3	37,9	41,4	38	35,5	35,8	37,4	36,1	37,5	35,3	35,8	35,7	35,8	35,8	35,9
4	35,4	36,2	34,6	38,3	38	36,6	36,7	38,6	41,7	38,1	35,5	36,4	37,5	36,7	37,8	35,3	36,3	35,9	36,3	36,3	36,2
5	35,4	36,2	34,6	38,4	38	36,7	36,9	38,9	41,7	38,3	35,7	36,4	37,6	36,7	38,4	35,4	36,3	36,1	36,4	36,4	36,2
6	35,4	36,2	34,6	38,4	38	36,8	37,1	38,9	41,7	38,4	35,7	36,4	37,6	36,9	38,5	35,4	36,3	36,2	36,5	36,2	36,2
7	35,4	36,2	34,9	38,4	37,9	36,8	37,1	38,9	41,6	38,4	35,7	36,4	37,6	36,9	38,7	35,4	36,3	36,3	36,6	36,2	36,2
8	35,4	35,4	34,9	38,1	37,9	36,8	37,1	38,7	41,5	38,4	35,7	36,4	37,6	36,9	38,7	35,4	36,3	36,4	36,6	36,6	35,4
9	35,4	35,4	34,9	37,9	37,8	36,8	37,1	38,2	41,4	38,4	35,7	36,1	37,6	36,9	38,7	35,4	36,3	36,4	36,6	36,6	35,3
10	35,4	35,3	34,5	37,7	37,8	36,8	37,1	38,3	41,4	37,9	35,7	35,9	37,5	36,9	38,4	35,4	36,2	36,4	36,6	36,6	35,2
11	35,1	35,2	34,3	37,7	37,7	36,8	37,1	38,3	41,4	37,9	35,6	35,9	37,5	36,7	38,4	35,3	36,2	36,4	36,6	36,6	35,1
12	35	35,1	34,3	37,6	37,6	36,6	37,1	38,3	41,4	37,8	35,5	35,8	37,5	36,5	38,3	35,2	36,1	36,4	36,5	36,5	35,1
13	35	35,1	34,3	37,2	37,6	36,5	37	38,2	41,3	37,9	35,5	35,7	37,4	36,4	38,2	35,2	36,1	36,3	36,5	35	35
14	35	35	34,2	37,1	37,5	36,5	36,9	38,2	41,3	37,8	35,4	35,6	37,4	36,4	38,2	35,2	36,1	36,3	36,4	35	35
15	34,9	35	34,2	37,1	37,5	36,3	36,9	38,1	41,3	37,8	35,4	35,5	37,2	36,4	38	35,1	36,1	36,2	36,3	35	35
Calculado																					
Cp de la yuca	0,45	0,49	0,49	0,54	0,61	0,55	0,56	0,55	0,64	0,55	0,51	0,50	0,52	0,53	0,62	0,48	0,52	0,53	0,53	0,53	0,53

ANEXO 23. CÁLCULOS PARA DETERMINAR EL CP POR MINUTO EN LA YUCA (REACTOR RECTANGULAR)

Cp por minuto en el Reactor Rectangular																			
Cp agua	1		1		1		1		1		1		1		1		1		1
W calorimetro (g)	47,4		47,4		47,4		47,4		47,4		47,4		47,4		47,4		47,4		47,4
Cp calorimetro	0,22		0,22		0,22		0,22		0,22		0,22		0,22		0,22		0,22		0,22
Cp recipiente	0,13		0,13		0,13		0,13		0,13		0,13		0,13		0,13		0,13		0,13
Cp caucho	0,062		0,062		0,062		0,062		0,062		0,062		0,062		0,062		0,062		0,062
W caucho (g)	0,2078		0,2078		0,2078		0,2078		0,2078		0,2078		0,2078		0,2078		0,2078		0,2078
Prueba No.	11		12		13		14		15		16		17		18		19		20
Corte : Longitudinal																			
W caja (g)	200		200		200		200		200		200		200		200		200		200
W yuca (g)	30,8		30,4		31		31,3		30,9		31,3		30,7		31,2		30,6		31,4
Vol. Agua ml.	200		200		200		200		200		200		200		200		200		200
°T Agua °C	17,5		17,9		18		17,9		18,4		18,1		18,4		18,3		18		17,9
°T Material °C	92		91,6		91,6		91,7		91,4		91,9		92,1		92		92		91,8
# laminas	17		17		17		17		17		17		17		17		17		17
Espesor laminas mm.	2		2		2		2		2		2		2		2		2		2

Minutos	°C	cp	°C	cp	°C	cp	°C	cp	°C	cp	°C	cp	°C	cp	°C	cp	°C	cp	°C	cp
1	24,4	-0,15	27,9	0,23	24,8	-0,15	23,4	-0,29	25,8	-0,07	25,2	-0,12	26,9	0,05	28,9	0,30	24,8	-0,15	25,3	-0,08
2	28,4	0,33	28	0,24	25	-0,13	24,5	-0,17	26	-0,05	26,1	-0,01	27,3	0,09	29,3	0,35	27,1	0,11	26,5	0,05
3	29,2	0,43	28,5	0,31	25,7	-0,05	24,8	-0,14	26,2	-0,03	26,5	0,03	28	0,18	30	0,44	27,9	0,21	27,1	0,12
4	29,5	0,47	28,8	0,35	27	0,11	25,2	-0,09	27,9	0,18	27,2	0,11	28,5	0,24	30,1	0,45	28,5	0,29	27,8	0,21
5	29,6	0,48	29,1	0,38	27,8	0,20	25,7	-0,04	28,5	0,25	28,1	0,22	29	0,30	30,1	0,45	29,1	0,36	29,3	0,39
6	29,6	0,48	29,4	0,42	28,2	0,25	26,3	0,03	29,4	0,37	28,7	0,30	29,1	0,32	30,2	0,46	29,5	0,42	29,6	0,43
7	29,7	0,49	29,8	0,48	28,8	0,33	26,9	0,10	29,5	0,38	29,4	0,38	29,4	0,36	30,2	0,46	29,9	0,47	29,8	0,46
8	29,9	0,52	30	0,50	29,2	0,38	28,4	0,28	29,8	0,42	29,7	0,42	29,4	0,36	30,2	0,46	29,9	0,47	30	0,48
9	29,9	0,52	30,1	0,52	29,4	0,40	28,9	0,35	29,8	0,42	29,9	0,45	29,4	0,36	30,2	0,46	30,1	0,49	30	0,48
10	30	0,53	30,1	0,52	29,7	0,44	29,2	0,38	29,8	0,42	29,9	0,45	29,8	0,41	30,2	0,46	30,1	0,49	30	0,48
11	30	0,53	30,1	0,52	30,1	0,50	29,7	0,45	29,8	0,42	29,9	0,45	29,8	0,41	30,1	0,45	30,1	0,49	30	0,48
12	30	0,53	30	0,50	30,1	0,50	29,7	0,45	29,8	0,42	29,9	0,45	29,8	0,41	30,1	0,45	30,1	0,49	29,9	0,47
13	30	0,53	30	0,50	30,1	0,50	29,7	0,45	29,7	0,41	29,6	0,41	29,7	0,39	30,1	0,45	29,9	0,47	29,9	0,47
14	30	0,53	29,9	0,49	30,1	0,50	29,7	0,45	29,7	0,41	29,6	0,41	29,7	0,39	30	0,44	29,9	0,47	29,8	0,46
15	29,9	0,52	29,9	0,49	30	0,48	29,6	0,44	29,7	0,41	29,5	0,40	29,7	0,39	30	0,44	29,8	0,45	29,8	0,46

Cp yuca	0,53		0,52		0,50		0,45		0,42		0,45		0,41		0,46		0,49		0,48	
----------------	-------------	--	-------------	--	-------------	--	-------------	--	-------------	--	-------------	--	-------------	--	-------------	--	-------------	--	-------------	--

ANEXO 26.CÁLCULO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD APARENTE EN LOS REACTORES

Densidad aparente de la yuca corte longitudinal

No de Pruebas	Teórico	Teórico	Calculado
	Masa de la muestra (g)	Volumen del contenedor (cm ³)	Densidad (g/cm ³)
1	30,50	26,59	1,15
2	31,40	26,59	1,18
3	31,30	26,59	1,18
4	30,30	26,59	1,14
5	31,00	26,59	1,17
6	30,70	26,59	1,15
7	32,00	26,59	1,20
8	31,20	26,59	1,17
9	30,60	26,59	1,15
10	30,80	26,59	1,16
11	30,80	26,59	1,16
12	30,40	26,59	1,14
13	31,00	26,59	1,17
14	31,30	26,59	1,18
15	30,90	26,59	1,16
16	31,30	26,59	1,18
17	30,70	26,59	1,15
18	31,20	26,59	1,17
19	30,60	26,59	1,15
20	31,40	26,59	1,18

Densidad aparente de la yuca corte transversal

No de Pruebas	Teórico	Teórico	Calculado
	Masa de la muestra (g)	Volumen del contenedor (cm ³)	Densidad (g/cm ³)
1	50,60	41,81	1,21
2	49,30	41,81	1,18
3	45,90	41,81	1,10
4	48,40	41,81	1,16
5	50,00	41,81	1,20
6	50,40	41,81	1,21
7	48,80	41,81	1,17
8	48,20	41,81	1,15
9	48,40	41,81	1,16
10	48,50	41,81	1,16
11	50,10	41,81	1,20
12	49,90	41,81	1,19
13	49,70	41,81	1,19
14	48,90	41,81	1,17
15	48,70	41,81	1,16
16	49,90	41,81	1,19
17	50,10	41,81	1,20
18	50,30	41,81	1,20
19	50,00	41,81	1,20
20	50,20	41,81	1,20

ANEXO 29. CALOR DE FUSION DE LOS VIDRIOS 1 Y 2

Ensayo Calor de fusión

Descriptive Statistics (yucacp.sta)

	Valid N	Mean	Median	Minimum	Maximum	Range	Std.Dev.	%Cv
CFV1	5	190,75	193,53	179,65	199,08	19,43	7,34	3,85
CFV2	5	190,20	187,98	182,43	196,30	13,88	6,02	3,16

Grouping: E7: Ensayo 7 (yucacp.sta)

Group 1: G_1:1

Group 2: G_2:2

	Mean	Mean				Valid N	Valid N	Std.Dev.	Std.Dev.	F-ratio	p
	G_1:1	G_2:2	t-value	df	p	G_1:1	G_2:2	G_1:1	G_2:2	variancs	variancs
CFVTOTAL	190,75	190,20	0,13	8	0,90	5	5	7,34	6,02	1,49	0,71

No hay diferencias significativas con un 5%

