

# UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA  
AGROINDUSTRIAL



CARACTERIZACIÓN FUNCIONAL DE LA FIBRA DE HOJAS DEL MAGUEY  
(*Agave americana* L.) OBTENIDAS MEDIANTE PROCESO HIDROTÉRMICO  
Y EXPANSIÓN POR EXPLOSIÓN DESTINADOS PARA LA INCLUSIÓN EN  
ALIMENTOS

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AGROINDUSTRIAL

JOSÉ DIAZ PILLACA

Abancay, julio de 2013

PERÚ



UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC	
CÓDIGO	MFN
T 1A5 D 2013	
FECHA DE INGRESO:	BIBLIOTECA CENTRAL 02 FEB. 2014
Nº DE INGRESO:	00351



**UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS  
DE APURÍMAC**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA  
AGROINDUSTRIAL**

**CARACTERIZACIÓN FUNCIONAL DE LA FIBRA DE HOJAS DEL MAGUEY  
(*Agave americana* L.) OBTENIDAS MEDIANTE PROCESO HIDROTÉRMICO Y  
EXPANSIÓN POR EXPLOSIÓN DESTINADOS PARA LA INCLUSIÓN EN  
ALIMENTOS**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

**JOSÉ DIAZ PILLACA**

**Abancay, julio de 2013**

**PERÚ**





CARACTERIZACIÓN FUNCIONAL DE LA FIBRA DE HOJAS DEL MAGUEY  
(*Agave americana* L.) OBTENIDAS MEDIANTE PROCESO HIDROTÉRMICO Y  
EXPANSIÓN POR EXPLOSIÓN DESTINADOS PARA LA INCLUSIÓN EN  
ALIMENTOS



## DEDICATORIA

Esta Tesis está dedicada a Dios por guiarme en todo momento, brindarme sabiduría y fortaleza para superar mis retos día a día.

A la memoria de mi padre José Díaz Pillaca con todo mi amor y gratitud que hoy disfruta la paz divina y Eduarda Nicolasa Pillaca Quispe, por su esfuerzo para cuidar de mí como madre y padre, su infinito amor, comprensión, confianza y por enseñarme la actitud perseverante, gracias por todo mamá.

A mi hermana Gladys Díaz Pillaca, su esposo Hermógenes Huarhuachi Pariona, por ser parte de mi vida, por sus palabras de aliento, sabios consejos y apoyo constante, gracias por estar siempre conmigo.

A mis sobrinas Deysi, Gimena y mi sobrino José Manuel por su cariño, ternura y por ser fuentes de alegría en la familia.

A mis amigos y amigas por brindarme su amistad y confianza en todos los momentos divertidos y difíciles. En especial a Edison Altamirano Gutiérrez, Víctor Ccasa Quispe, Francy Gutiérrez Arenas, Alfredo Miranda Quispe, Elit Huarancca Urquizo, Dina Karina García Medina, Edwin Serna Pérez, Nelly Carbajal Aguilar y Robert Ccahuana Peceros.



## AGRADECIMIENTOS

A mi Alma Mater, la UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC por brindarme la oportunidad de estudiar en sus aulas y pasar los más hermosos e inolvidables días de mi vida; asimismo, por el financiamiento parcial en el cuarto concurso de proyecto de tesis 2011.

Mi eterno agradecimiento a mi asesor de Tesis, Ing. M. Cs. Fulgencio Vilcanqui Pérez por la confianza y amistad que ha depositado desde mi formación profesional, y por haberme guiado en el mundo de la investigación. Esta Tesis no hubiese sido posible sin sus conocimientos, su apoyo constante y su paciencia. Es todo un placer trabajar a vuestro lado.

A los integrantes del Jurado Evaluador, por sus atinadas sugerencias para enriquecer este trabajo y por la parte de su valioso tiempo que destinaron a la revisión del mismo.

A todos mis docentes de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Agroindustrial gracias por sus conocimientos compartidos, su sabiduría académica y sus consejos.

A mi gran amigo y colega Ing. Edison Altamirano Gutiérrez, por todo el apoyo que siempre me ha brindado para realizar esta Tesis, desde la planeación hasta la culminación; asimismo por su entusiasmo, amistad y sobre todo por haber compartido conmigo momentos tristes y alegres, gracias promoción.

Al Ing. Jorge Beltrán Mendoza Cáceres, por apoyar en la investigación, palabras de ánimo durante las pruebas experimentales de la Tesis y por haber sido mi maestro.

Al C.P.C. Samuel A. Medina Cárdenas, por sus valiosos consejos y ayudarme en el transcurso de la ejecución de esta Tesis, así como el apoyo durante mi formación profesional. He aprendido que las cosas por sencillas que parezcan, cada día se deben hacer mejor.

Al Lic. Wilber Fernando Venegas Torres, por sus gestos de motivación constante, apoyo durante la realización de esta Tesis y por haber compartido conmigo momentos alegres.

Al C.P.C. Camilo Hurtado Córdova y Econ. Samuel Quispe Sicha, magníficos amigos quienes me apoyaron desinteresadamente cuando más los necesitaba.

A mi amiga y pronto colega Francy Gutiérrez Arenas, gracias por sus palabras de motivación en los momentos difíciles de la investigación y compartir una amistad incondicional.

A mi amiga M.V.Z. Elit Huarancca Urquizo, por estar en el momento más oportuno durante la investigación y compartir largas pláticas agradables.

Al Rvdo. Padre Oscar Arbieta Mamani y Rvdo. Padre Sergio López Camacho por sus sabios consejos para seguir adelante en mi formación profesional y enseñarme la fe en Dios.



Al Ing. Wilman Altamirano Gutiérrez, por su apoyo logístico en la adquisición de los reactivos químicos.

A mi amigo y pronto colega Edwin Serna Pérez, por haberme apoyado en los momentos complicados del manejo del expansor tipo batch en las pruebas experimentales.

Al Ing. Abel Enrique Mujica Paredes, por su entusiasmo y las facilidades prestadas para la autorización del uso de algunos reactivos fiscalizados.

Al Ing. Ruth Mery Ccopa Flores, por su motivación constante para seguir adelante con la investigación y apoyo con algunos materiales bibliográficos.

Al Ing. Didí Juan Flores Cruz por las sugerencias pertinentes en la aplicación de la tecnología de expansión por explosión para la realización de esta Tesis.

Al Ing. Justo Flavio Arias Mottal, por apoyarme y facilitarme los equipos pertinentes del Laboratorio de Procesamiento de Productos Agroindustriales.

Al Ing. Alfredo Fernández Ayma por las facilidades prestadas para utilizar el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

A mis compañeros tesisistas, Ronald M. Bastidas Pimentel, Braulio F. Merma Río, Marina Hoyos Mallqui, Héctor J. Bazán Juro, Rogger Joaquín Barrios, Felipe Rivera Rodas y Jhony Quispe Quilca, por compartir momentos agradables en los diferentes laboratorios de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Agroindustrial-UNAMBA.

En general, agradecer a todas aquellas personas que me brindaron su ayuda y su apoyo invaluable para realizar esta Tesis, tanto a los que he citado como a los que no. Vosotros sabéis quiénes sois, gracias por compartir conmigo muchos momentos inolvidables y la satisfacción de cumplir mi objetivo.



# UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC

## FACULTAD DE INGENIERÍA

### ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

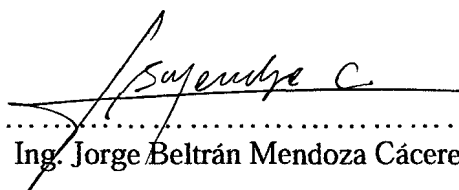
El jurado evaluador da constancia que el presente trabajo de Tesis presentado por Bach.  
José Diaz Pillaca:

#### CARACTERIZACIÓN FUNCIONAL DE LA FIBRA DE HOJAS DEL MAGUEY (*Agave americana* L.) OBTENIDAS MEDIANTE PROCESO HIDROTÉRMICO Y EXPANSIÓN POR EXPLOSIÓN DESTINADOS PARA LA INCLUSIÓN EN ALIMENTOS

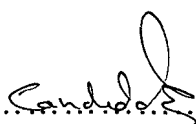
Fue sustentado y aprobado en fecha 19 de julio de 2013.



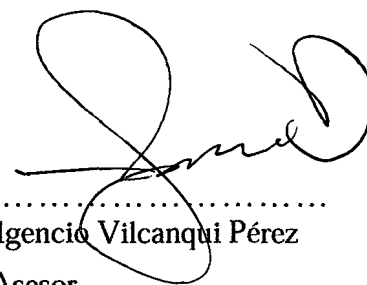
.....  
Ing. Ruth Mery Ccopa Flores  
Presidente del jurado



.....  
Ing. Jorge Beltrán Mendoza Cáceres  
Primer miembro del jurado

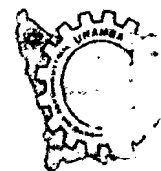


.....  
Lic. Cándida López Loayza  
Segundo miembro del jurado



.....  
Ing. M. Cs. Fulgencio Vilcanqui Pérez  
Asesor





**CONSTANCIA N° 093-2013-D-EAPIA-UNAMBA**

**LA QUE SUSCRIBE, DIRECTORA DE LA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC.**

**HACE CONSTAR:**

Que, el señor **JOSE DIAZ PILLACA**, Bachiller en Ingeniería Agroindustrial de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, ha aprobado la modalidad de **SUSTENTACION** de la Tesis titulada "**Caracterización funcional de la fibra de hojas del maguey (*Agave americana* L.) obtenidas mediante proceso hidrotérmico y expansión por explosión destinados para la inclusión en alimentos**"; habiendo obtenido el calificativo de **dieciocho (18)**, de acuerdo al Libro de Actas para sustentación de tesis EAPIA, folios N° 42 y 43, por lo cual, se declara **EXPEDITO** para optar el Título Profesional de Ingeniero Agroindustrial.

Se expide la presente constancia a petición del interesado y en aplicación al Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac.

Abancay, 26 de julio del 2013

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL  
  
Ing. Ruth M. Coopa Flores  
DIRECTORA (e)

C.c.  
Archivo



## ÍNDICE DE CONTENIDO

Sección	Página
LISTA DE TABLAS .....	i
LISTA DE FIGURAS .....	ii
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS .....	iii
RESUMEN .....	v
ABSTRACT .....	vii
<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>II. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>3</b>
2.1. MAGUEY .....	3
2.1.1. Aspectos generales .....	3
2.1.2. Clasificación taxonómica .....	4
2.1.3. Descripción botánica .....	4
2.1.4. Variedades .....	5
2.1.5. Usos populares .....	6
2.1.5.1. Medicina tradicional .....	6
2.1.5.2. Agroforestería .....	6
2.1.5.3. Alimentación del hombre .....	6
2.1.5.4. Material de construcción .....	7
2.2. HOJA DEL MAGUEY .....	7
2.2.1. Características químicas y nutricionales .....	7
2.2.2. Importancia industrial y alimentaria .....	8
2.3. FIBRA VEGETAL .....	9
2.3.1. Estudio de la pared celular .....	9
2.3.2. Componentes de la pared celular vegetal .....	10
2.3.2.1. Celulosa .....	10
2.3.2.2. Hemicelulosa .....	11
2.3.2.3. Lignina .....	12
2.3.2.4. Sustancias pécticas .....	14
2.3.2.5. Sustancias asociadas .....	14



2.4. FIBRA DIETÉTICA .....	14
2.4.1. Definición .....	14
2.4.2. Clasificación .....	15
2.4.2.1. Fibra soluble .....	15
2.4.2.2. Fibra insoluble .....	16
2.4.3. Propiedades funcionales .....	16
2.4.3.1. Capacidad de absorción de agua .....	17
2.4.3.2. Capacidad de retención de agua .....	17
2.4.3.3. Capacidad de hinchamiento .....	18
2.4.3.4. Capacidad de absorción de grasa .....	18
2.4.4. Efectos fisiológicos y beneficios en la salud .....	20
2.4.4.1. Mejoras en la salud gastrointestinal .....	20
2.4.4.2. Mejoras en la tolerancia a la glucosa .....	22
2.4.4.3. Reducción de hiperlipidemia e hipercolesterolemia .....	23
2.4.4.4. Reducción del riesgo de desarrollar algunos tipos de cáncer .....	25
2.4.4.5. Digestión de lípidos y un cierto grado de control de peso .....	26
2.4.5. Consumo de fibra dietética: recomendaciones y necesidades .....	26
2.5. MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DETERMINACIÓN DE FIBRA DIETÉTICA .....	28
2.5.1. Métodos químicos .....	28
2.5.1.1. Método de fibra bruta .....	28
2.5.1.2. Métodos detergentes .....	28
2.5.2. Métodos enzimáticos .....	29
2.5.1.1. Métodos enzimático-gravimétricos .....	29
2.5.1.2. Métodos enzimático-químicos .....	30
2.6. MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE FIBRA .....	30
2.6.1. Proceso hidrotérmico .....	32
2.6.1.1. Generalidades .....	32
2.6.1.2. Definición del proceso hidrotérmico .....	32
2.6.2. Expansión por explosión .....	33
2.6.2.1. Generalidades .....	33
2.6.2.2. Definición de expansión por explosión .....	34



<b>III. PARTE EXPERIMENTAL</b> .....	<b>35</b>
3.1. LUGAR DE INVESTIGACIÓN .....	35
3.2. MATERIA PRIMA, EQUIPOS, MATERIALES Y REACTIVOS .....	35
3.2.1. Materia prima .....	35
3.2.2. Equipos e instrumentos .....	35
3.2.3. Materiales .....	36
3.2.4. Reactivos .....	37
3.2.5. Indumentaria .....	38
3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA .....	38
3.4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	39
3.4.1. Materia prima .....	39
3.4.1.1. Hoja del maguey .....	39
3.4.1.2. Cuantificación de fibra detergente neutro y propiedades funcionales de la materia prima .....	39
3.4.2. Descripción del proceso de obtención de fibra mediante el método hidrotérmico y expansión por explosión .....	39
3.4.2.1. Operaciones preliminares .....	40
3.4.2.2. Obtención de fibra mediante proceso hidrotérmico .....	42
3.4.2.3. Obtención de fibra con expansión por explosión .....	44
3.5. MÉTODOS DE ANÁLISIS .....	47
3.5.1. Cuantificación de fibra por métodos detergentes .....	47
3.5.1.1. Determinación de fibra detergente neutro .....	47
3.5.1.1.1. Fundamento .....	47
3.5.1.1.2. Preparación de solución fibra detergente neutro .....	47
3.5.1.1.3. Procedimiento .....	48
3.5.1.2. Determinación de fibra detergente ácida .....	49
3.5.1.2.1. Fundamento .....	49
3.5.1.2.2. Procedimiento .....	50
3.5.1.3. Determinación de lignina detergente ácida .....	50
3.5.1.3.1. Fundamento .....	51
3.5.1.3.2. Procedimiento .....	51



3.5.2. Metodología de evaluación de propiedades funcionales .....	52
3.5.2.1. Determinación de capacidad de absorción de agua .....	52
3.5.2.1.1. Procedimiento .....	52
3.5.2.2. Determinación de capacidad de retención de agua .....	52
3.5.2.2.1. Procedimiento .....	52
3.5.2.3. Determinación de capacidad de hinchamiento .....	53
3.5.2.3.1. Procedimiento .....	53
3.5.2.4. Determinación de capacidad de absorción de grasa .....	54
3.5.2.4.1. Procedimiento .....	54
3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	55
3.6.1. Factores de estudio y variables de respuesta .....	55
3.6.2. Diseño experimental .....	56
3.6.3. Análisis de datos .....	57
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>59</b>
4.1. ANÁLISIS PRELIMINARES .....	59
4.1.1. Determinación de propiedades funcionales por métodos físicos .....	59
4.1.2. Determinación de fibra por métodos detergentes .....	59
4.2. OBTENCIÓN DE FIBRA MEDIANTE PROCESO HIDROTÉRMICO .....	60
4.2.1. Determinación de propiedades funcionales por métodos físicos .....	60
4.2.1.1. Capacidad de absorción de agua .....	60
4.2.1.2. Capacidad de retención de agua .....	63
4.2.1.3. Capacidad de hinchamiento .....	68
4.2.1.4. Capacidad de absorción de grasa .....	72
4.2.2. Determinación de fibra por métodos detergentes .....	75
4.3. OBTENCIÓN DE FIBRA CON EXPANSIÓN POR EXPLOSIÓN .....	78
4.3.1. Determinación de propiedades funcionales por métodos físicos .....	78
4.3.1.1. Capacidad de absorción de agua .....	78
4.3.1.2. Capacidad de retención de agua .....	82
4.3.1.3. Capacidad de hinchamiento .....	85
4.3.1.4. Capacidad de absorción de grasa .....	88
4.3.2. Determinación de fibra por métodos detergentes .....	91
4.4. SELECCIÓN DE PARÁMETROS PARA LA OBTENCIÓN DE FIBRA .....	94



<b>V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	98
5.1. CONCLUSIONES .....	98
5.2. RECOMENDACIONES .....	100
<b>VI. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	101
<b>VII. ANEXOS</b> .....	116
ANEXO 1. Compuestos químicos aislados de las hojas de maguey .....	117
ANEXO 2. Resultados del análisis estadístico de la capacidad de absorción de agua en la fibra obtenida mediante proceso hidrotérmico .....	119
ANEXO 3. Resultados del análisis estadístico de la capacidad de retención de agua en la fibra obtenida mediante proceso hidrotérmico .....	121
ANEXO 4. Resultados del análisis estadístico de la capacidad de hinchamiento en la fibra obtenida mediante proceso hidrotérmico .....	123
ANEXO 5. Resultados del análisis estadístico de la capacidad de absorción de grasa en la fibra obtenida mediante proceso hidrotérmico .....	125
ANEXO 6. Resultados del análisis estadístico del contenido de fibra detergente neutro obtenida mediante proceso hidrotérmico .....	127
ANEXO 7. Resultados del análisis estadístico de la capacidad de absorción de agua en la fibra obtenida con expansión por explosión .....	129
ANEXO 8. Resultados del análisis estadístico de la capacidad de retención de agua en la fibra obtenida con expansión por explosión .....	131
ANEXO 9. Resultados del análisis estadístico de la capacidad de hinchamiento en la fibra obtenida con expansión por explosión .....	133
ANEXO 10. Resultados del análisis estadístico de la capacidad de absorción de grasa en la fibra obtenida con expansión por explosión .....	135
ANEXO 11. Resultados del análisis estadístico del contenido de fibra detergente neutro obtenida con expansión por explosión .....	137
ANEXO 12. Resultados del análisis estadístico de la comparación del tratamiento seleccionado del proceso hidrotérmico y expansión por explosión .....	139
ANEXO 13. Metodología para determinación de humedad .....	141



ANEXO 14.	Resultados del contenido de fibra detergente neutro, fibra detergente ácida y lignina detergente ácida obtenidas mediante proceso hidrotérmico .....	142
ANEXO 15.	Resultados de las propiedades funcionales de las fibras obtenidas mediante proceso hidrotérmico .....	143
ANEXO 16.	Resultados del contenido de fibra detergente neutro, fibra detergente ácida y lignina detergente ácida obtenidas mediante expansión por explosión .....	144
ANEXO 17.	Resultados de las propiedades funcionales de las fibras obtenidas con expansión por explosión .....	145
ANEXO 18.	Esquema del diseño factorial $2^3$ para obtención de fibra mediante proceso hidrotérmico .....	146
ANEXO 19.	Esquema del diseño factorial $2^3$ para obtención de fibra con expansión por explosión .....	147
ANEXO 20.	Resultados del análisis estadístico de la comparación del tratamiento seleccionado del proceso hidrotérmico y expansión por explosión con fibra sin tratar .....	148
ANEXO 21.	Fotografías del desarrollo experimental del trabajo de investigación .....	149



## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
Tabla 1.	Valores de propiedades funcionales en diferentes fuentes de fibra .....	19
Tabla 2.	Requerimientos diarios de fibra dietética distribuidos por sexo y edad .....	27
Tabla 3.	Composición de reactivos de fibra detergente neutro .....	48
Tabla 4.	Niveles de los factores de estudio y variables de respuesta de la investigación .....	55
Tabla 5.	Valores de las propiedades funcionales de la fibra de hojas del maguey .....	59
Tabla 6.	Componentes de fibra detergente neutro de la fibra de hojas del maguey .....	59
Tabla 7.	Valores de las propiedades funcionales de la fibra de hojas del maguey obtenidas mediante proceso hidrotérmico .....	61
Tabla 8.	Componentes de fibra detergente neutro obtenidos mediante proceso hidrotérmico .....	78
Tabla 9.	Valores de las propiedades funcionales de fibra de hojas del maguey obtenidas con expansión por explosión .....	80
Tabla 10.	Componentes de fibra detergente neutro obtenidos con expansión por explosión .....	93
Tabla 11.	Parámetros seleccionados para la obtención de fibra de hojas del maguey mediante proceso hidrotérmico y expansión por explosión .....	95



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
Figura 1.	Maguey ( <i>Agave americana</i> L.) .....	3
Figura 2.	Estructura de la pared celular de los vegetales .....	10
Figura 3.	Molécula básica de la celulosa .....	11
Figura 4.	Monómeros y estructura de lignina .....	13
Figura 5.	Diagrama de flujo experimental para obtención de fibra a partir de las hojas del maguey mediante proceso hidrotérmico y expansión por explosión .....	41
Figura 6.	Capacidad de absorción de agua de fibra de <i>Agave americana</i> comparado con otros productos .....	63
Figura 7.	Capacidad de retención de agua de fibra de <i>Agave americana</i> comparado con otros productos .....	67
Figura 8.	Capacidad de hinchamiento de fibra de <i>Agave americana</i> comparado con otros productos .....	71
Figura 9.	Capacidad de absorción de grasa de fibra de <i>Agave americana</i> comparado con otros productos .....	74
Figura 10.	Capacidad de absorción de agua de fibra de <i>Agave americana</i> comparado con otros productos .....	82
Figura 11.	Capacidad de retención de agua de fibra de <i>Agave americana</i> comparado con otros productos .....	85
Figura 12.	Capacidad de hinchamiento de fibra de <i>Agave americana</i> comparado con otros productos .....	88
Figura 13.	Capacidad de absorción de grasa de fibra de <i>Agave americana</i> comparado con otros productos .....	90

## ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

<b>Significado</b>	<b>Abreviatura/Símbolo</b>
Altamente significativo	**
Capacidad de absorción de agua	CAA
Capacidad de absorción de grasa	CAG
Capacidad de hinchamiento	CH
Capacidad de retención de agua	CRA
Coefficiente de determinación ajustado	$R^2_{aj}$
Coefficiente de determinación	$R^2$
Coefficiente de variabilidad	CV
Cuadrado medio	CM
Fibra detergente ácido	FDA
Fibra detergente neutro	FDN
Fuerza relativa centrífuga	<i>g</i>
Grados centígrados	°C
Grados de libertad	GL
Gramos	g
Humedad	H
Kilogramo	Kg
Lignina detergente ácida	LDA
Materia prima	M
Método de expansión por explosión	M2
Método de proceso hidrotérmico	M1
Mililitros	mL



**ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS (Continuación)**

<b>Significado</b>	<b>Abreviatura/Símbolo</b>
No significativo	NS
Número de repeticiones	n
Peso	p
Presión	P
Relación materia prima: agua	R
Revolución por minuto	RPM
Significancia	Sig
Significativo	*
Suma de cuadrados	SC
Temperatura	T
Tiempo	t
Valor calculado de F	Fo
Valor de P obtenido en software estadístico	P-valor



## RESUMEN

Se estudiaron diferentes parámetros en el método hidrotérmico y expansión por explosión para obtener fibra a partir de las hojas del maguey, con el objetivo de identificar los mejores parámetros en función del contenido de fibra detergente neutro y las propiedades funcionales con fines de inclusión en alimentos.

Los resultados mostraron que el mejor parámetro seleccionado para la obtención de fibra mediante proceso hidrotérmico corresponde al tratamiento 8 con temperatura de agua de 90 °C, 15 minutos y 1:2 de relación de materia prima: agua (p/v) obteniéndose 71.21% de fibra detergente neutro y propiedades funcionales de 7.32 g de agua absorbida/g de fibra (capacidad de absorción de agua), 9.65 g de agua retenida/g de fibra (capacidad de retención de agua), 9.94 mL de incremento/g de fibra (capacidad de hinchamiento) y 4.02 g de aceite absorbido/g de fibra (capacidad de absorción de grasa); mientras en el método de expansión por explosión el mejor parámetro seleccionado corresponde al tratamiento 7 con una presión en el expansor de 110 lbf/plg<sup>2</sup>, 110 g de fibra y 62% de humedad obteniéndose 55.43% de fibra detergente neutro y propiedades funcionales de 6.74 g de agua absorbida/g de fibra (capacidad de absorción de agua), 7.74 g de agua retenida/g de fibra (capacidad de retención de agua), 6.73 mL de incremento/g de fibra (capacidad de hinchamiento) y 4.16 g de aceite absorbido/g de fibra (capacidad de absorción de grasa).

Las fibras obtenidas por el método hidrotérmico son los que permiten mejores propiedades funcionales determinados por parámetros físicos y el contenido de fibra detergente neutro con respecto al método de expansión por explosión. Además en el método hidrotérmico la temperatura de agua es el factor que ejerce mayor influencia sobre las propiedades funcionales y el contenido de fibra detergente neutro; mientras en el método de expansión por explosión es la presión en el expansor. Comparado con otras

fuentes de fibra de origen vegetal, el producto en estudio presenta valores superiores o iguales en la mayoría de los casos que hacen adecuada como un ingrediente en diversos productos alimentarios bajos en calorías y deficientes en fibra.

**PALABRAS CLAVE:** Maguey, *Agave americana*, fibra detergente neutro, fibra insoluble, celulosa, hemicelulosa, método hidrotérmico, expansión por explosión, propiedad funcional



## ABSTRACT

Different parameters were studied in method hydrothermal and explosion expansion for fiber from the maguey leaves, in order to identify the best parameters according to the neutral detergent fiber content and functional properties for inclusion in foods.

The results showed that the best parameter selected for obtaining corresponding fiber by hydrothermal treatment process 8 Water temperature 90 °C, 15 minutes 1:2 feedstock ratio: water yielding 71.21% neutral detergent fiber and properties functional 7.32 g of water absorbed / g of fiber (water absorption capacity), 9.65 g water retained / g fiber (water retention capacity), 9.94 mL of increase / g fiber (swelling water capacity) and 4.02 g of oil absorbed / g of fiber (fat absorption capacity), while in the method of explosively expanding the best treatment corresponds to the selected parameter 7 with a pressure in the expander 110 lbf/plg<sup>2</sup>, 110 g of fiber and 62% humidity yielding 55.43% neutral detergent fiber and functional properties 6.74 g of water absorbed / g of fiber (water absorption capacity), 7.74 g water retained / g fiber (water retention capacity), 6.73 mL of increase / g fiber (swelling capacity) and 4.16 g of oil absorbed / g fiber (fat absorption capacity).

The fibers obtained by the hydrothermal method are those that allow improved functional properties determined by physical parameters and the neutral detergent fiber content on the method of expansion explosion. Besides the hydrothermal method water temperature is the factor that has the most influence on the functional properties and neutral detergent fiber content, while the expansion method is the pressure blast in the expander. Compared to other sources of plant fiber, the new product has values greater than or equal in most cases to make it suitable as an ingredient in various food products and low calorie deficient fiber.



**KEYWORDS:** Maguey, *Agave americana*, Neutral detergent fiber, fibe insoluble, cellulose, hemicellulose, method hydrothermal, explosion expansion, functional properties



## I. INTRODUCCIÓN

La fibra dietética no tuvo ningún estudio hasta hace cuatro décadas por desconocimiento de sus beneficios fisiológicos en el hombre, sin embargo en los últimos años el interés de los científicos ha crecido progresivamente a partir de los estudios de Burkitt y Trowell en el año de 1972; quienes evidenciaron que el efecto preventivo de la fibra dietética en enfermedades gastrointestinales y cardiovasculares del hombre está en función de sus efectos fisiológicos y éstos, a su vez, de las propiedades fisicoquímicas de las mismas (Burkitt y Trowell, 1975; Amen y Spiller 1999). En la actualidad un alto consumo de fibra dietética se asocia con una menor incidencia de trastornos y enfermedades comunes en las sociedades desarrolladas, tales como trastornos intestinales crónicas, obesidad, diabetes, enfermedades cardiovasculares, y el cáncer al colon (Navarro-González *et al.*, 2011).

El maguey (*Agave americana* L.), comúnmente conocido como pajpa, chuchau, agave, Okce packpa o cabuya es una planta perenne de hojas anchas, gruesas y suculentas que crece y se adapta muy bien a tierras áridas y secas del Perú (Bautista, 2006), que por el momento no tiene explotación industrial. La propuesta de utilizar las hojas como nueva fuente de materia prima en la industria alimentaria, pretende aprovechar el maguey existente y fomentar su cultivo en lugares con pocas utilidades agrícolas y carentes de riego; en la región Apurímac esta superficie de terreno llegan a 75,421 hectáreas, que representa el 8.69 % del territorio regional (INEI, 1994).

La mayor parte de la morfología botánica del maguey son las hojas duras constituidas por algunas fibras solubles y mayoría por fibras insolubles como la celulosa, hemicelulosa y lignina; la inclusión en alimentos en su forma natural resulta siendo de poca utilidad, como consecuencia de la compleja estructura fisicoquímica que presentan las



moléculas de esta fibra. Es necesario entonces identificar un método de obtención con parámetros controlados que permita mejorar las propiedades funcionales y aumentar el contenido de fibra detergente neutro para proporcionar la funcionalidad en un cierto tipo de alimento. Entre los métodos recomendados para la desnaturalización de componentes vegetales es el proceso hidrotérmico y expansión por explosión, pero se desconocen los parámetros de operación para la obtención de fibra de hojas del Maguey, por lo que los objetivos que se plantearon en el presente estudio son los siguientes:

### **Objetivo General**

Evaluar la fibra de hojas del maguey (*Agave americana* L.) obtenidas mediante proceso hidrotérmico y expansión por explosión en función de las propiedades funcionales y fibra detergente neutro para la inclusión en alimentos.

### **Objetivos Específicos**

- Determinar los mejores parámetros de obtención de fibra de hojas del maguey mediante proceso hidrotérmico en función del contenido de fibra detergente neutro y propiedades funcionales expresadas en capacidad de absorción de agua, capacidad de retención de agua, capacidad de hinchamiento y capacidad de absorción de grasa.
- Determinar los mejores parámetros de obtención de fibra de hojas del maguey mediante expansión por explosión en función del contenido de fibra detergente neutro y propiedades funcionales expresadas en capacidad de absorción de agua, capacidad de retención de agua, capacidad de hinchamiento y capacidad de absorción de grasa.



## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. MAGUEY

#### 2.1.1. ASPECTOS GENERALES

El maguey (*Agave americana* Linneo) es una especie abundante originaria de América. Se encuentra distribuido desde Estados Unidos, México, Centro América, Panamá, Región Caribe, Colombia y Venezuela. Es ampliamente naturalizado y cultivado por todo el mundo en climas tropicales y subtropicales templados (Thiede, 2001; Khare, 2007). En la Figura 1 se muestra la morfología completa del maguey.



Figura 1. Maguey (*Agave americana* L.)

En los andes del Perú es una especie de uso múltiple desde épocas prehispánicas y se encuentra hasta los 3800 m.s.n.m. (Brack, 1999; Venero, 2006; Pardo, 2005). Crece en zonas muy soleadas, tolera la sequía y los niveles bajos de nutrientes del suelo. Se propagan por brotes basales que crecen alrededor de la planta madre o por semillas a 20 °C en el comienzo de la primavera (Rivera *et al.*, 2010).

### 2.1.2. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

Según Bautista, (2006) el maguey se ubica en la siguiente posición taxonómica:

División	: Fanerógamas
Sub – División	: Angiospermas
Clase	: Monocotiledóneas
Orden	: Iridíneas
Familia	: Amarilidáceas
Sub – familia	: Agavoidea
Género	: Agave
Especie	: Americana
Nombre científico	: <i>Agave americana</i> L.
Nombres comunes	: Maguey, Ocke packpa, mara, cabuya, pinca, ckara, chuchau, kellupancarita, oje-pajpa, pita, penca azul, maguey mexicano, papa, pajpa, penca (Brack, 1999).

### 2.1.3. DESCRIPCIÓN BOTÁNICA

El maguey tiene raíz amplia y robusta, rosetas de hasta 2 m de alto y 2.5-4 m de diámetro (Reynoso *et al.*, 2012).

La hoja es de color verde grisáceo muchas veces azulado, 1.5 a 2 m de largo, 15 a 25 cm de ancho en la base, angostas al extremo, lanceoladas a algo espatuladas, erectas o algo recurvadas, acanaladas en el haz, superficie ligeramente áspera, margen ondulado a crenado; dientes sobre mamilas, en la parte media de 0.5-1 cm de largo, 0.6-1.2 cm de ancho, rectos o recurvados; espina terminal 3.5-4

cm de largo, color café oscuro o grisáceo (Pardo, 2005; Bautista, 2006; Reynoso *et al.*, 2012).

La planta emite el tallo desde el centro de la roseta entre los 7 y los 10 años, de 6 a 10 m de altura, contorno general ovalado, fértil desde la mitad o el tercio superior, ramas primarias 20-35 cm ancho, 1-1.2 m largo; pedúnculo verde-glaucos, brácteas del pedúnculo 30-60 cm largo, base hasta 10 cm, triangulares, cactáceas, margen entero, espina 1-1.5 mm largo (Pardo, 2005; Reynoso *et al.*, 2012).

Las flores son de 6-7.5 cm largo, hipocrateriformes, verde-amarillentas; tépalos 2.5-3.5 cm largo, oblongos, gruesos, tubo del perigonio 1-1.5 cm largo, ovario 2.5-3 cm largo, cuello 2-5 mm; estambres con filamentos 5.5 a 8 cm largo, insertos en la parte media del tubo. Cápsulas de 4 a 5.5 cm largo y 2 a 2.5 cm ancho. Las semillas son 9 a 10 mm largo y 7 a 8 mm ancho, de color negro (Pardo, 2005; Bautista, 2006; Reynoso *et al.*, 2012).

#### 2.1.4. VARIEDADES

El Maguey tiene numerosas subespecies, variedades y cultivariedades que han sido citadas por diversos autores y continúan en estudio para su identificación, sin embargo, se diferencian por el color de las hojas y la más conocida y ampliamente distribuida es la variedad Americana cuyas hojas son de color verde grisáceo; mientras la variedad de Marginata, Medio-picta y Striata son cultivados como plantas ornamentales (Guillot y Der, 2006; Guillot *et al.*, 2009).

La variedad Marginata presenta hojas de color verde-azulado, con banda submarginal de color amarillo en ocasiones con rayas amarillas; la variedad Medio-picta posee hojas de color verde-azulado en el margen y amarillo pálido o

blanquecino en el centro, con alguna raya verde, en tanto que la variedad *Striata* tiene hojas obovadas de color verde-azulado y numerosas estrías de color amarillo-blanquecino y anchura variable, que nacen desde la base de la hoja (Guillot *et al.*, 2009).

## **2.1.5. USOS POPULARES**

### **2.1.5.1. Medicina tradicional**

La savia de raíz es usado como abortivo para la regulación de fertilidad en mujeres de varios grupos étnicos de India (Kumar *et al.*, 2012), en tanto que las flores y raíces coccionadas son administradas por vía oral como purificador de sangre (De la cruz *et al.*, 2007). El zumo de las hojas se utilizan para tratamiento de verrugas, úlceras y tumores cancerosos (Daniel, 2006); las hojas tatemadas se aplican localmente contra dolores musculares (González y Galván, 1992) y coccionadas se usan para el tratamiento de la gonorrea y conjuntivitis (Brack, 1999).

### **2.1.5.2. Agroforestería**

El maguey es aprovechado como barreras vivas en el control de erosión en laderas, estabilización de canales y andenes, también se acomoda en hileras para delimitar parcelas agrícolas (Vázquez-García *et al.*, 2007, Brack, 1999).

### **2.1.5.3. Alimentación del hombre**

El uso alimentario está basado en la elaboración artesanal de aguamiel, vinagre, mermelada y chancaca a partir de la savia extraído del maguey (Pardo, 2005; Brack, 1999).



#### **2.1.5.4. Material de construcción**

Las hojas del maguey constituyen una importante fuente en la obtención de fibras naturales muy resistentes, maleables y muy apreciadas. En Perú, Ecuador y Bolivia estas fibras se usan para elaboración de sogas y hondas de los pastores; además, son utilizados en la construcción de mallas de pesca, cestas, mallas de carga, objetos ornamentales y puentes colgantes. El tallo floral maduro y seco se usa para construcción de viviendas, puertas, ventanas y corrales de los animales (Bautista, 2006; Macía, 2006).

## **2.2. HOJA DEL MAGUEY**

### **2.2.1. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y NUTRICIONALES**

Estudios químicos realizados sobre hojas del maguey han permitido el aislamiento y la identificación de más de 50 metabolitos pertenecientes a categorías de saponinas y sapogeninas esteroidales, alcaloides, cumarina, isoflavonoides, ácido piscídico y aminoácidos que se indican en el Anexo 1; dichos metabolitos identificados se encuentran en su mayoría en la cutícula (parte externa) de las hojas. Además, diversas investigaciones reportan el gran potencial de esta planta para el desarrollo de nuevos medicamentos, como son: tratamiento de determinados cánceres en seres humanos, agentes biocontroladores, biofertilizantes y biofungicidas para las plantas (Guleria y Kumar, 2009; Anchorena, 1995; Siddhapura *et al.*, 2011; Sharma *et al.*, 2011; Daniel, 2006).

### **2.2.2. IMPORTANCIA INDUSTRIAL Y ALIMENTARIA**

En un estudio Khade *et al.*, (2011) determinaron la actividad citotóxica y antitumoral de los extractos etanólicos de hojas del maguey utilizando tres métodos



in vitro, en tanto Anajwala *et al.*, (2010) demostraron actividad citotóxica del extracto metanólico empleando líneas celulares de cultivo provenientes de carcinoma de mama.

Los extractos metanólicos de hojas y tallos de esta planta mostraron actividad antifúngica en el crecimiento de los hongos: *Alternaria brassica*, causante de la podrición de las hojas de mostaza; *Postia placenta*, responsable de la podredumbre marrón de algunas maderas y *Candida albicans*, hongo que provoca afección vaginal (vaginitis), de la cavidad oral, del intestino y de la piel (Guleria y Kumar, 2009; Siddhapura *et al.*, 2011; Chea *et al.*, 2007); también se demostraron que la extracción acuosa y metanólica actúa como antiesporulante en *Sclerospora graminicola*, agente causante de moho veloso en plantas de India (Deepak *et al.*, 2005; Deepak *et al.*, 2007). En otro estudio, Rosas-Taraco *et al.*, (2011) utilizando extractos acuosos de hojas y tallos demostraron disminución significativa de producción de aflatoxinas (metabolitos secundarios tóxicos y cancerígenos) y crecimiento de cepas en *Aspergillus parasiticus* (hongo que se encuentra en productos agrícolas básicos, como los cereales, el trigo integral, pan de centeno, semillas de aceite, maíz, algodón y maní).

En la industria farmacéutica, a partir de la hecogenina extraída de las hojas de maguey se fabrican los corticosteroides, dexametasona y betametasona (Daniel, 2006), medicamentos que actúan como antiinflamatorio, inmunosupresor y antialérgico (Lázaro y García, 2010; Olivera *et al.*, 1997). Para la alimentación del hombre se ha formulado néctar de aguamiel (exudado líquido que se obtiene en el



tallo escapular) con aceptabilidad sensorial y tiempo de vida útil de tres meses (Bautista, 2006).

## **2.3. FIBRA VEGETAL**

### **2.3.1. ESTUDIO DE LA PARED CELULAR**

El término de fibra se asocia botánicamente con los compuestos de la pared celular vegetal que poseen estructura fibrosa (Rojas, 1994). Esta pared consta de una compleja mezcla de polisacáridos y otros polímeros, que son secretados por las células y ensamblados en una red organizada, mediante enlaces covalentes y no covalentes. Las paredes celulares vegetales también contienen proteínas estructurales, enzimas, polímeros fenólicos y otros materiales que modifican las características físicas y químicas de la pared. Cumple muchos procesos de crecimiento vegetal, desarrollo, mantenimiento y reproducción que se resume a continuación (Taiz y Zeiger, 2006):

- Determina el soporte mecánico de las estructuras vegetales, lo que permite a estas estructuras crecer hasta grandes alturas.
- Mantienen cohesionadas unas células con otras, y evitan su deslizamiento.
- Actúa como un “exoesqueleto” que controla la forma celular y permite generar una presión de turgencia elevada.
- La pared celular es necesaria para las relaciones hídricas normales de las plantas, porque delimita las relaciones entre la presión de turgencia y el volumen celular.
- Actúa como una barrera de difusión que limita el tamaño de las macromoléculas que pueden alcanzar la membrana plástica desde el exterior y es la principal barrera estructural para la invasión de los patógenos.

### 2.3.2. COMPONENTES DE LA PARED CELULAR VEGETAL

La fibra vegetal compone la celulosa, hemicelulosa, lignina, sustancias pécticas y sustancias asociadas (Mateos-Aparicio, 2008). La representación de la pared celular de los vegetales se muestra en la Figura 2.

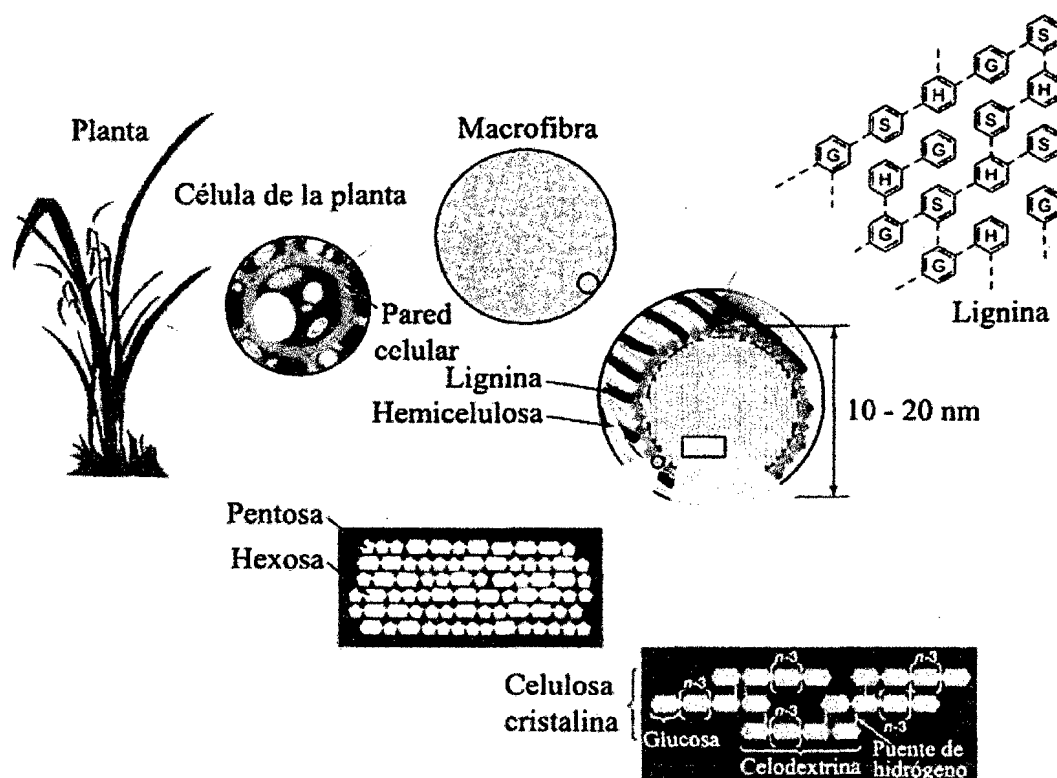


Figura 2. Estructura de la pared celular de los vegetales

Fuente: Tomado de Rubin, (2008).

#### 2.3.2.1. Celulosa

Es el principal constituyente de las paredes celulares de las plantas terrestres y sustancia orgánica natural más abundante (Whistler, 1999). En la pared celular, las cadenas de celulosa se agregan formando microfibrillas que constituyen el elemento base de los materiales celulósicos (Rodríguez, 2006).

Químicamente es un polisacárido lineal no ramificado formado por unidades de glucosa unidas por enlace glicosídico  $\beta$ -D-(1,4). Los grupos hidroxilo de las unidades de glucosa favorecen la formación de puentes de hidrógeno intra e intercatenariamente lo que conduce a la formación de microfibrillas que forman una estructura cristalina muy estable. Esta disposición estructural junto a su composición química le confiere un carácter insoluble e impermeable en agua. (Izydorczyk *et al.*, 2005 y Mateos-Aparicio, 2008).

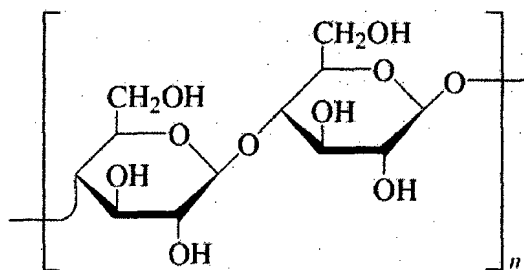


Figura 3. Molécula básica de la celulosa

Fuente: Tomado de Akin, (2010).

La estructura terciaria de la celulosa, estabilizada por numerosos hidrógenos intermoleculares adheridas y fuerzas de van der Waals produce bultos cristalinos fibrosos tridimensionales; sólo mediante modificaciones físicas y por medios químicos encuentra aplicaciones en varios productos alimenticios (Izydorczyk *et al.*, 2005).

#### 2.3.2.2. Hemicelulosa

Se agrupan bajo esta denominación polisacáridos de estructura compleja y diferente composición química, que por hidrólisis generan pentosas, hexosas y ácidos urónicos. Dentro de este grupo tan heterogéneo se presentan, las hemicelulosas

neutras que incluyen pentosanos de arabinosa y xilosa, y hexosanos de galactosa, manosa y glucosa; y las hemicelulosas ácidas, donde aparecen los ácidos galacturónico y glucurónico, enlazados entre sí por enlaces glicosídicos, formando estructuras ramificadas y en general amorfas (Rodríguez, 2006). Actúa como relleno entre celulosa y lignina (Reddy y Yang, 2005); normalmente es insoluble, pero puede ser también parcialmente soluble (Córdova, 2005).

Todas las hemicelulosas poseen dos características estructurales comunes: son polímeros que presentan una cadena principal plana de azúcares con enlaces  $\beta$ -(1,4), de la que puede salir un número variable de ramificaciones laterales cortas; además poseen alguna característica que les impide formar agregados cristalinos y, por tanto, su estructura es menos rígida que la de la celulosa. Pueden cristalizar con las cadenas de celulosa formando puentes de hidrógeno entre los grupos  $-\text{CH}_2\text{OH}$  de las cadenas de celulosa y los oxígenos glicosídicos de las hemicelulosas (Rodríguez, 2006; Mateos-Aparicio, 2008). A diferencia de polisacáridos pécticas, son por lo general solubilizados sólo por tratamientos que interrumpen las adhesiones de hidrógeno que los unen fuertemente a la celulosa microfibrilar. Tales tratamientos incluyen fuerzas crecientes de álcali (Waldron *et al.*, 2003).

### 2.3.2.3. Lignina

Es un polímero aromático amorfo de alto peso molecular compuesto de residuos de fenil-propano que forman una matriz tipo a base de la condensación de tres alcoholes fenólicos primarios (coniferil, sinapil, y p-coumaril alcoholes) (Córdova, 2005). Además es muy resistente a la biodegradación y sus funciones son proteger a



la celulosa del ataque microbiano, conferir resistencia e impermeabilidad a los materiales lignificados, y mantener unidas las fibras celulósicas (Rodríguez, 2006).

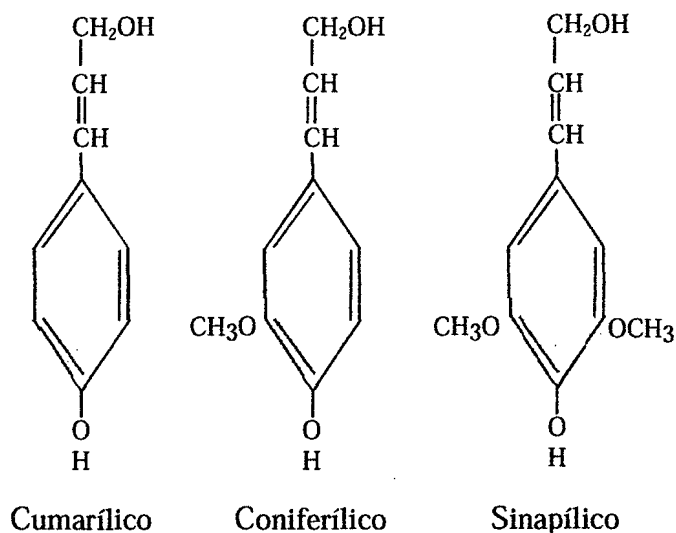


Figura 4. Monómeros y estructura de la lignina

Fuente: Tomado de Benítez, (2011).

La lignina actúa como material cementante en la pared celular, rellenando los huecos que quedan entre las fibrillas de celulosa (Martínez-Alcalá, 2012). El elevado tamaño molecular de la lignina, la gran estabilidad de su estructura y su unión covalente con los polisacáridos (hemicelulosa y celulosa) confiere a la pared una gran rigidez e impide el crecimiento celular. Además, la lignina, al ocupar el espacio entre los polisacáridos que antes era agua, disminuye la hidratación de la pared así como su permeabilidad al agua y los solutos. Por esta razón, una célula con elevado grado de lignificación será una célula muerta ya que se encontrará prácticamente aislada (Lewis y Yamamoto, 1990; citado por Vilcanqui, 2009).

#### 2.3.2.4. Sustancias pécticas

Con este nombre se engloban al grupo de sustancias asociadas a la hemicelulosa. Siendo macromoléculas coloidales capaces de absorber gran cantidad de agua (hidrocoloides) y formadas esencialmente por ácido D-galacturónico unidos por enlaces  $\alpha$  (1,4). Las sustancias pécticas son solubles en agua y tienen capacidad de formar geles en presencia de ácidos, sales y azúcares (Vilcanqui, 2009 y Badui, 2006). La fibras dietéticas ricas en pectina tiende a exponer valores más altos para propiedades de hidratación que otras fibras debido a la higroscopicidad de sustancias pécticas (Tosh y Yada, 2010).

#### 2.3.2.5. Sustancias asociadas

Se encuentran varias sustancias, como los mucílagos (polímeros que contienen en su mayoría ácidos urónicos); las gomas (otros polisacáridos); los compuestos inorgánicos, como la sílice y otras sales; materiales cerosos como las grasas epicuticulares y pequeñas cantidades de glicoproteínas (Amen y Spiller 1999).

### 2.4. FIBRA DIETÉTICA

#### 2.4.1. DEFINICIÓN

El término fibra dietética o alimentaria fue introducida por primera vez, por Hispley en 1953, quien describió como el material derivado de la pared celular vegetal en los alimentos (Díaz, 2008; García *et al.*, 2009). Más tarde la American Association of Cereal Chemists (AACC, 2001) define como la parte comestible de las plantas o carbohidratos análogos que son resistentes a la digestión y absorción en el intestino delgado humano con fermentación completa o parcial en el intestino grueso; también incluye polisacáridos, oligosacáridos, lignina, y sustancias asociadas de

vegetales; promoviendo efectos beneficiosos fisiológicos como laxante, atenuación del nivel del colesterol y la glucosa en la sangre.

En la actualidad la comisión de Codex Alimentarius define como polímeros de carbohidratos con diez o más unidades monoméricas, que no son hidrolizados por las enzimas endógenas en el intestino delgado de los seres humanos y que pueden pertenecer a tres categorías: polímeros de carbohidratos comestibles que se consumen de forma natural en los alimentos; polímeros de carbohidratos obtenidos de materia prima alimentaria por medios físicos, enzimáticos o químicos que tengan comprobado efecto fisiológico benéfico sobre la salud humana; polímeros de carbohidratos sintéticos que tengan comprobado efecto fisiológico benéfico sobre la salud humana y demostrados con pruebas científicas generalmente aceptadas por las autoridades competentes (FAO/WHO Codex Alimentarius Commission, 2009; Almeida *et al.*, 2013).

#### **2.4.2. CLASIFICACIÓN**

La clasificación más aceptada de fibra dietética está en función de la solubilidad y grado de fermentación en un sistema *in vitro* usando a un representante de solución acuosa de enzimas digestivos humanos. La fibra parcialmente fermentable e insoluble en agua conforma la celulosa, hemicelulosa y lignina; en tanto que la fibra fermentable y soluble incluyen las sustancias pécticas, gomas, mucílagos y algunas hemicelulosas (Elleuch *et al.*, 2011; Dhingra *et al.*, 2012).

##### **2.4.2.1. Fibra soluble**

Las fibras solubles forman un gel que retarda el tránsito de material a lo largo del tracto (Tortora y Derrickson, 2007), aumenta la viscosidad y reduce la respuesta

glicémica y el colesterol plasmático (Elleuch *et al.*, 2011). La adición de la fibra dietética en los alimentos contribuye a la estabilización de la estructura (dispersiones, emulsiones) a través de la formación de gel o engrosamiento de la fase continua (Capitani *et al.*, 2012).

#### **2.4.2.2. Fibra insoluble**

Las fibras insolubles pasan a través del tubo digestivo sin sufrir cambios, pero aceleran el paso del material (Tortora y Derrickson, 2007). En los alimentos aumenta la firmeza de los productos y proporciona una alta capacidad de absorción de grasa (Capitani *et al.*, 2012).

#### **2.4.3. PROPIEDADES FUNCIONALES**

Son propiedades no nutricionales que influyen en el comportamiento de algunos componentes de un alimento (Alcázar, 2002). En la fibra dietética dependen de sus propiedades fisicoquímicas, las condiciones de procesamiento de alimentos (Lan *et al.*, 2012) y la composición de sus fracciones solubles e insolubles (Lecumberri *et al.*, 2007). Comprenden la propiedad de hidratación (capacidad de hinchamiento, capacidad de absorción y retención de agua), capacidad de retención de grasa o aceite, densidad aparente, propiedades reológicas, porosidad, tamaño de partícula y la capacidad de intercambio iónico que afectan a las características nutricionales y sensoriales de los alimentos y juega un papel importante en el comportamiento físico de los alimentos o sus ingredientes durante la preparación, procesamiento y almacenamiento (Tiwari y Cummis, 2011). Dentro de las propiedades que se han citado, las propiedades de hidratación, la capacidad de intercambio catiónico y absorción de moléculas orgánicas tienen una mayor importancia desde el punto de

vista nutricional (Bach Knudsen, 2001). Las principales propiedades funcionales procedentes de diversas fuentes de fibra se muestran en la Tabla 1.

#### **2.4.3.1 . Capacidad de absorción de agua**

Es definida como la cantidad de agua que una fuente de fibra es capaz de absorber cuando se le coloca en una cantidad suficiente de la misma, siendo importante esta propiedad cuando la fibra ha de emplearse en productos extrudidos, ya que el material debe ser humectado antes del proceso y durante el mismo. Se relaciona con la composición química de la fibra, el origen de los compuestos asociados, el pH y la forma en que se prepara la muestra (Zambrano *et al.*, 2001; citado por Sánchez, 2005).

#### **2.4.3.2 . Capacidad de retención de agua**

Es la cantidad del agua que permanece unida a la fibra hidratada después de la aplicación de una fuerza externa, como la presión o centrifugación. El uso del término retención de agua (water retention) fue preferido para evitar la confusión con el uso inconsecuente de unión de agua (water binding) o posesión de agua (water holding) (Robertson *et al.*, 2000; Raghavendra *et al.*, 2004; Tosh y Yada, 2010). La capacidad de retención de agua está en relación directa con la capacidad de absorción de agua; sin embargo el primero además de absorber las moléculas de agua, mide la capacidad de retenerla a lo largo del tiempo, razón por lo en la metodología para su determinación el centrifugado se efectúa después de haber almacenado por 18 horas (Vilcanqui, 2009). Asimismo, la capacidad de las fibras dietéticas para retener el agua está fuertemente relacionada con la fuente de la fibra dietética (Elleuch *et al.*, 2011).



#### 2.4.3.3 . Capacidad de hinchamiento

Es la medida de la proporción del volumen ocupado cuando la muestra es sumergida en exceso de agua después del equilibrio de peso real (Raghavendra *et al.*, 2004; Raghavendra *et al.*, 2006; Tosh y Yada, 2010; Borchani *et al.*, 2012). En el proceso de solubilización es la primera parte. Consiste en la entrada de agua que expande las macromoléculas hasta que son completamente extendidas y dispersadas, después del cual se solubilizan (Mateos-Aparicio, 2008).

#### 2.4.3.4. Capacidad de absorción de grasa

Es la cantidad de aceite retenido por las fibras después de la mezcla, incubación con aceite y centrifugación (Elleuch *et al.*, 2011). La capacidad de distintas fibras para secuestrar e incluso unirse químicamente a sustancias orgánicas como ácidos biliares, colesterol y sustancias cancerígenas puede tener un papel importante en determinados efectos fisiológicos que se le atribuyen a la fibra dietética (Mateos-Aparicio, 2008).



Tabla 1. Valores de propiedades funcionales en diferentes fuentes de fibra

Fuentes de fibra	Propiedades funcionales				Referencias
	CAA (g/g)	CRA (g/g)	CH (mL/g)	CAG (g/g)	
Fruto de níspero	1.31		3.61		Sánchez, 2005
Bagazo de carambola			4.84	2.63	Chau <i>et al.</i> , 2004
Cáscara de mango	3.34		5.80		Sánchez, 2005
Salvado de trigo		4.61	5.79		Zhu <i>et al.</i> , 2010
Cáscara de cacao		4.76	6.51		Lecumberri <i>et al.</i> , 2007
Paja de arroz tratado con H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		9.92	9.49	7.29	Sangnark y Noomhorm, 2004
Cáscara de <i>Diospyros kaki</i>		6.18	9.53		Akter <i>et al.</i> , 2010
Raíz de <i>Polygonatum odoratum</i> tratado con vapor a 100 °C		21.14	9.81	24.17	Lan <i>et al.</i> , 2012
Bagazo de pomelo		2.09	8.02	1.52	Figuerola <i>et al.</i> , 2005
Bagazo de limón		1.74	9.19	1.48	Figuerola <i>et al.</i> , 2005
Bagazo de naranja		1.65	6.11	1.81	Figuerola <i>et al.</i> , 2005
Concentrado de manzana		1.87	8.27	0.60	Figuerola <i>et al.</i> , 2005
Hongo Shiitake		5.64	14.70	3.08	Takahashi <i>et al.</i> , 2009; Martínez-Flores <i>et al.</i> , 2009
Fruto de mango		8.81	16.08	4.65	Al-Sheraji <i>et al.</i> , 2011
Bagazo de coco		5.33	20.00	4.80	Raghavendra <i>et al.</i> , 2006
Pulpa de calabaza		23.00	25.00		Escalada Pla <i>et al.</i> , 2007
Hoja de <i>Agave tequilana</i> con tratamiento hidrotérmico	9.22	7.54		4.70	Vilcanqui, 2009
Hoja de <i>Agave tequilana</i> tratado con presión de vapor de H <sub>2</sub> O	9.83	8.16		4.90	Vilcanqui, 2009
Hoja de <i>Agave tequilana</i> tratada con HCl	4.31	4.10		2.96	Vilcanqui, 2009

#### 2.4.4. EFECTOS FISIOLÓGICOS Y BENEFICIOS EN LA SALUD

Quienes consumen una dieta rica en fibras tienen un riesgo menor de obesidad, diabetes, aterosclerosis, cálculos biliares, hemorroides, diverticulitis, apendicitis y cáncer colorrectal (Tortora y Derrickson, 2007).

Se consideran cinco consecuencias fisiológicas principales que poseen las dietas naturalmente altas en la fibra dietética: Mejoras en la salud gastrointestinal, mejoras en la tolerancia a la glucosa, reducción de hiperlipidemia e hipercolesterolemia y otros factores de riesgo de cardiopatía isquémica, reducción del riesgo de desarrollar algunos tipos de cáncer, digestión de lípidos y un cierto grado de control de peso (Viuda-Martos *et al.*, 2010; Lunn y Buttriss, 2007; Buttriss y Stokes, 2008).

##### 2.4.4.1. Mejoras en la salud gastrointestinal

Los principales hidratos de carbono que llegan al intestino grueso del hombre son los polisacáridos no amiláceos (Celulosa y hemicelulosa), el almidón resistente, oligosacáridos no digeribles y algunos polioles, almidones y féculas modificados (Viuda-Martos *et al.*, 2010; Buttriss y Stokes, 2008).

Los componentes de fibra son total o parcialmente fermentadas como fuente de energía por la microflora intestinal en el intestino grueso (colon), los hidratos de carbono se transforman en gases (hidrógeno, metano y dióxido de carbono) y en ácidos grasos de cadena corta (AGCC) principalmente acetato, propionato y butirato; al mismo tiempo la disponibilidad de sustrato de hidratos de carbono tiene resultados en el colon con el aumento de número de bacterias y por lo tanto un aumento de la masa fecal (Buttriss y Stokes, 2008). El ácido propiónico ha sido



reportado como inhibidor de la síntesis de colesterol hepático; el ácido butírico es el principal sustrato de la mucosa intestinal, protegiéndolo contra la generación de enfermedades como colitis y cáncer colónico (Goñi y Martín-Carrón, 2001, citado por Priego, 2007); el ácido acético es tomado por el músculo y metabolizado como fuente de energía (Larrauri *et al.*, 1996). Algunos componentes de fibra absorbe el líquido y así aumentar el peso de las heces, y esto, junto con el aumento de la biomasa microbiana asociada a la fermentación, determina en gran medida el peso de las heces provocando un aumento en su peristaltismo, lo que facilita la función evacuatoria (Molina y Martín, 2007; Buttriss y Stokes, 2008).

Se cree que los AGCC producidos como consecuencia de la fermentación de la fibra son importantes por varias razones. Una de ellas es que el butirato es combustible preferido de los colonocitos y puede ser un factor de protección primaria de la salud de estas células. Otra razón es bajar el pH en el colon y, en consecuencia inhibir el crecimiento de organismos patógenos y también la formación de los productos de descomposición tóxicos (Scott *et al.*, 2008). Mientras en el flujo sanguíneo sistémico los AGCC absorbidos constituyen una fuente de energía y también provocan efectos beneficiosos sobre el metabolismo de los lípidos y posiblemente de glucosa (Buttriss y Stokes, 2008).

Los componentes no hidrosolubles (celulosa, hemicelulosa y lignina), aumentan la velocidad del tránsito intestinal, en cambio, las fibras hidrosolubles (pectina y guar, entre otras) tienen la propiedad de disminuir la velocidad de absorción intestinal de la glucosa (el vaciamiento gástrico resulta más lento), y además dificultan el contacto con el epitelio intestinal absorbente. En general,



cualquier fibra con alta proporción de fibra insoluble y elevada capacidad de retención de agua mejora el funcionamiento gastrointestinal, lo que conduce a un aumento de la cantidad de heces y por consiguiente un menor tiempo de tránsito intestinal (Monreal *et al.*, 2002; citado por Vilcanqui, 2009).

#### **2.4.4.2. Mejoras en la tolerancia a la glucosa**

El efecto beneficioso de la fibra dietética en los parámetros metabólicos postprandiales y control de la glucosa ha sido objeto de numerosos estudios durante las últimas décadas (Behall *et al.*, 2006). Algunos, pero no todos, los estudios relacionados muestran una asociación inversa entre la ingesta total de fibra dietética y el riesgo de desarrollar diabetes tipo 2 (Buttris y Stokes, 2008). Las personas que consumen una dieta con un alto Índice Glucémico (IG), junto con una baja ingesta de fibra de cereales tienen un riesgo de desarrollar diabetes tipo 2 en un 75% mayor que los que consumen una alta ingesta de fibra de cereales en combinación con un IG bajo (Schulze *et al.*, 2004).

Las reducciones en las concentraciones de glucosa en plasma, como resultado del consumo de fuentes de fibra viscosa pueden ser debido a varios eventos. En primer lugar, las fibras viscosa ingerido causa enlentecimiento del vaciado gástrico mediante la formación de una matriz de gel como resultado de su capacidad de retención de agua (Viuda-Martos *et al.*, 2010). Como estas fibras hidratadas entran en el intestino delgado, la matriz del gel puede engrosar el contenido del intestino delgado, y ayudar en la modulación de los procesos digestivos por la disminución de la difusión de nutrientes para la absorción y el contacto entre los alimentos y las enzimas digestivas. Además, en la absorción de



superficies, la ingestión de fibras viscosas puede espesar la capa de agua agitada por el cual la difusión de glucosa y el colesterol se desarrolla muy lentamente (Viuda-Martos *et al.*, 2010).

#### **2.4.4.3. Reducción de hiperlipidemia e hipercolesterolemia**

Los resultados de numerosos estudios epidemiológicos y clínicos han sido tan convincentes que el consumo moderado o elevado de fibras de la dieta puede reducir efectivamente el riesgo de enfermedades cardiovasculares a través de su acción sobre la Lipoproteína de Baja Densidad (LDL) – colesterol. El mecanismo exacto por las cuales fibras de la dieta baja los niveles séricos de LDL no se conoce (Viuda-Martos *et al.*, 2010). Sin embargo, la evidencia sugiere que ocurre la interferencia con los lípidos y / o el metabolismo de los ácidos biliares. La propiedad hipocolesterolémico de algunas de fibras dietéticas, como el coco se asocia con el agua de las fracciones de fibra soluble, el ácido urónico, glucomannans, y galactomananos (Trinidad *et al.*, 2006), debido a que los ácido urónicos y galactomananos no son digeridos en el intestino delgado, pero son metabolizados por la microflora en el intestino grueso para producir ácidos grasos de cadena corta, tales como acetato, propionato, butirato y que contribuyen a reducir los niveles de colesterol sérico. El butirato es metabolizado principalmente por las células de colon de la mucosa, mientras que propionato y acetato se absorbe rápidamente. Se ha supuesto que la producción de ácidos grasos de cadena corta, y en particular, los cambios en la proporción de propionato / acetato, pueden influir en el metabolismo de los lípidos (Trinidad *et al.*, 2006; Viuda-Martos *et al.*, 2010). La reducción de los niveles del colesterol y otros lípidos por fibras alimenticias



puede ser una consecuencia de un aumento de la viscosidad de fase acuosa, una modificación en interrupción cinética de fusión, y la absorción reducida de lípido, colesterol, y ácido de bilis (Viuda-Martos *et al.*, 2010).

La obesidad es otro factor de riesgo independiente para las enfermedades cardiovasculares (Viuda-Martos *et al.*, 2010). La ingesta de fibra se asocia inversamente con el riesgo de cardiopatía coronaria (Van Horn *et al.*, 2008). En un análisis conjunto de diez estudios prospectivos en los EE.UU. y Europa Pereira *et al.*, (2004), reportaron una disminución del 14% en el riesgo de cardiopatía isquémica por cada 10 g / día en el aumento de la fibra dietética y un 27% menor riesgo de muerte coronaria.

Buttriss y Stokes (2008) al revisar la evidencia de enfermedad cardiovascular comentó que aunque algunos estudios han señalado un efecto específico de fibra de cereales, la relación no es tan fuerte como la relación inversa entre el consumo de granos enteros y la enfermedad coronaria, vegetales de hoja verde y la enfermedad coronaria, o de verduras crucíferas , los cítricos / jugos y vitamina C, verduras y frutas ricas en el caso de accidente cerebrovascular; pero se sugiere que algunos componentes de la fibra dietética, en particular los de las frutas y los cereales (por ejemplo, la goma de guar, pectina, beta-glucano y psyllium; los llamados fibras solubles) puede reducir los niveles de colesterol en la sangre mediante la alteración de la absorción de colesterol y de ácidos biliares y por los efectos sobre la producción de lipoproteínas y la síntesis hepática de colesterol.



#### 2.4.4.4. Reducción del riesgo de desarrollar algunos tipos de cáncer

La ingesta de fibra dietética puede reducir el riesgo de cáncer colorrectal mediante el aumento de la velocidad de tránsito de material de alimentos a través del intestino grueso, la fermentación en el intestino grueso, y mediante la producción de altos niveles de ácidos grasos de cadena corta. Hay pruebas de que el butirato puede reducir el riesgo de cambios malignos en las células (Viuda-Martos *et al.*, 2010). Estudios realizados en el ciego de una población de ratas alimentadas con preparados de fibra dietética demostraron que el aumento de grupaje de heces fecales y el pH bajo, así como una mayor producción de AGCC, se asocia con la disminución en la incidencia de cáncer de colon, y se ha sugerido que se asemejan a los efectos de fibra dietética soluble (Tharanathan y Mahadevamma, 2003).

La Investigación Europea en Protección de Cáncer en otro estudio relató una reducción del 40 % en el riesgo de cáncer colorrectal entre las más bajas (15 g / día) y el más alto (35 g / día) de consumo. En este estudio, el efecto protector se debe a fibras de todas las fuentes, por lo tanto, el tipo y la fuente de la fibra puede ser irrelevante en términos de los beneficios observados. En otro estudio mencionan que una de las hipótesis sobre el desarrollo de cáncer de colon y recto es originado por las excesivas cantidades de ácidos biliares en el intestino. La fibra tendrá un efecto beneficioso importante porque reduce la secreción de ácidos biliares e incrementa su excreción en las heces (Molina y Martín, 2007).

Hay pruebas sustanciales que afirman una relación directa con el aumento de consumo de carne, sobre todo la carne procesada y el cáncer colorrectal (Buttriss



y Stokes, 2008). Se demostró que el impacto de la ingesta alta de carne en el riesgo puede ser compensado por el alto consumo de fibra dietética (más de 27 g / día) (Norat *et al.*, 2005).

#### **2.4.4.5. Digestión de lípidos y un cierto grado de control de peso**

Las dietas bajas en energía y de materia grasa, que normalmente se recomienda para reducción de peso, son poco saciantes pero no hay pruebas de que la adición de la fibra dietética puede ayudar a mejorar este cumplimiento (Buttriss y Stokes, 2008). Se propone que una dieta rica en fibra puede aumentar la movilización y utilización de las reservas de grasa como resultado directo de una reducción en la secreción de insulina (Tapsell, 2004).

El consumo de 14 g de fibra extra / día puede resultar en una reducción del 10% en el consumo de energía y una pérdida de peso promedio de 1.9 kg en las intervenciones de una duración promedio de 3.8 meses. Los alimentos ricos en fibra suelen tener un alto volumen y una menor densidad de energía que pueden ayudar a promover la saciedad por lo tanto, juegan un papel en la el control de balance de energía (Lunn y Buttriss 2007; Slavin y Green 2007).

#### **2.4.5. CONSUMO DE FIBRA DIETETICA: RECOMENDACIONES Y NECESIDADES**

La fibra dietética consumida debe ser equilibrada entre 25% de fibra soluble y 75% de fibra insoluble y se recomienda que provenga de todos los tipos de alimentos que la contienen: cereales, frutas, verduras y legumbres (Zarzuelo y Gálvez, 2010). La media de consumo de fibra dietética oscila de 12 a 29 g/día en los diferentes países y existen, en general, diferencias de consumo para hombres y mujeres. Las



estimaciones para mujeres son menores que para los hombres, aunque esto es lógico ya que la ingesta de alimentos y energía total, normalmente, es menor en mujeres que en hombres (Mateos-Aparicio, 2008).

Las necesidades diarias de fibra dietética varían con la edad y el sexo, tal como se muestra en la Tabla 2 (Slavin y Jacobs, 2010). Las necesidades más altas se encuentran en el intervalo de edades comprendidas entre los 14-50 años, con un valor de 38 g/día para el hombre, 25-26 g/día para la mujeres y 29 g/día para mujeres en embarazo y lactancia. En general, comparando el consumo de fibra con los requerimientos diarios aconsejados, se puede decir que el consumo de fibra es inferior al recomendado, por lo que sería aconsejable aumentarlo (Benítez, 2011).

Tabla 2. Requerimientos diarios de fibra dietética distribuidos por sexo y edad

Grupo de etapa de vida	Consumo adecuado (g/día)	
	Hombre	Mujer
1 – 3 años	19	19
4 – 8 años	25	25
9 – 13 años	31	26
14 – 18 años	38	26
19 – 30 años	38	25
31 – 50 años	38	25
51 – 70 años	30	21
> 70 años	30	21
Embarazo		
< 18 años		29
19 – 50 años		28
Lactancia		
< 18 años		29
19 – 50 años		29

Fuente: Slavin, (2005); Slavin y Jacobs, (2010).



## 2.5. MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DETERMINACIÓN DE FIBRA DIETÉTICA

La medición de fibra dietética en los alimentos es un tema complejo, asociado a la definición de la fibra (Elleuch *et al*, 2011). La ausencia de un acuerdo internacional para definir y elegir un método adecuado para el análisis de la fibra dietética hace que existan diversos métodos para aislar y fraccionar el grupo de sustancias que la conforman. Los métodos analíticos se pueden agrupar en métodos químicos y enzimáticos (Mateos-Aparicio, 2008).

### 2.5.1. MÉTODOS QUÍMICOS

Consisten en la eliminación de distintos componentes de los alimentos por medio de reactivos químicos, aislando una fracción que corresponde a la parte no digestible de los mismos (Mateos-Aparicio, 2008). Estos métodos fueron los primeros, e incluyen la fibra cruda y los métodos detergentes (Elleuch *et al*, 2011).

#### 2.5.1.1. Método de fibra bruta

Consiste en un ataque secuencial con ácido ( $H_2SO_4$  1.25%) y con álcali (NaOH 1.25%) obteniéndose un residuo denominado fibra bruta. Este método aísla sólo una parte de la fracción de fibra insoluble (Tosh y Yada, 2010), por lo tanto presenta grandes inconvenientes ya que no se cuantifican un 80% de las hemicelulosas, un 60% de la lignina y un 50% de la celulosa (Mateos-Aparicio, 2008).

#### 2.5.1.2. Métodos detergentes

Se fundamenta en el uso de soluciones detergentes a pH ácido y neutro para el análisis de fibra dietética. El método detergente ácido propuesto por Van Soest en

1963 utiliza bromuro de cetil trimetil amonio en  $H_2SO_4$  1N y determina la celulosa y lignina; en tanto que el método detergente neutro utiliza como detergente el lauril sulfato sódico y evalúa igualmente fibra insoluble, pero en este caso incluye, además de celulosa y lignina, también hemicelulosas (Rodríguez, 1993).

Uno de los inconvenientes más importantes de los métodos detergentes es que no determina la fracción soluble de la fibra (Mateos-Aparicio, 2008; Elleuch *et al.*, 2011).

## 2.5.2. MÉTODOS ENZIMÁTICOS

Son los más utilizados en la actualidad. Se basan en la eliminación del almidón y la proteína mediante hidrólisis enzimática. Estos métodos tratan de emular la degradación enzimática que sufren los alimentos en el tracto gastrointestinal y se subdividen en dos grupos (Mateos-Aparicio, 2008).

### 2.5.2.1. Métodos enzimático-gravimétricos

El aislamiento de la fibra se efectúa tras una serie de tratamientos químicos y enzimáticos, y se cuantifica gravimétricamente (Mateos-Aparicio, 2008). Se han propuesto numerosos métodos enzimáticos que, con el paso del tiempo, han ido incluyendo enzimas de mayor eficacia (Rodríguez, 1993). Sin embargo, tras muchas variaciones en la actualidad, el método más empleado de los incluidos en este grupo, que por otra parte está reconocido como oficial por la A.O.A.C. (Association of Oficial Analytical Chemists) es el conocido como método de Prosky, que cuantifica la fibra de manera gravimétrica y considera la fibra dietética como polisacáridos no digeribles más lignina (Díaz, 2008).

Este método determina la fibra dietética por eliminación del almidón con  $\alpha$ -amilasa termoestable (denominado termamyl) y amiloglucosidasa, y de la proteína con proteasa. Este procedimiento permite cuantificar las dos fracciones de fibra gravimétricamente; en ambos casos en el residuo de fibra obtenido debe sustraerse el contenido de proteína y cenizas (Mateos-Aparicio, 2008; Díaz, 2008).

#### 2.5.2.2. Métodos enzimático-químicos

A través de tratamientos enzimáticos y químicos, la fibra se fracciona en sus distintos elementos, analizándose instrumentalmente su composición (Mateos-Aparicio, 2008).

En los últimos años se han desarrollado numerosos métodos de análisis que pueden englobarse en este grupo, entre los que destacan está el método de Uppsala y el método de Englyst. Estos métodos se fundamentan en el aislamiento del residuo de fibra dietética y su posterior hidrólisis de polisacáridos a monosacáridos; después se identifican y cuantifican por cromatografía mediante la formación de derivados volátiles, y los ácidos urónicos por espectrofotometría (Mateos-Aparicio, 2008).

### 2.6. MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE FIBRA

Las propiedades físico-químicas en la obtención de fibra dietética puede ser manipulado a través de tratamientos químicos, enzimático, mecánico (molienda), térmico (ebullición o cocción) y termo-mecánico (extrusión y la descompresión instantánea controlada) para mejorar su funcionalidad (Elleuch *et al.*, 2011; Dhingra *et al.*, 2012). Algunos tratamientos se han estudiado en la obtención de



bioetanol con el propósito de remover la lignina y hemicelulosa, reducir la cristalinidad de celulosa y aumentar la porosidad del material (Cortínez, 2010).

La molienda puede afectar a las propiedades de hidratación, en particular, la cinética de absorción de agua debido al incremento del área superficial de las fibras (Dhingra *et al.*, 2012). En la fibra dietética obtenida del residuo de coco, la reducción del tamaño de partícula hasta 0.55 mm aumentó la capacidad de retención del agua y la capacidad de hinchamiento, mayores reducciones de tamaño disminuyeron sus propiedades (Raghavendra *et al.*, 2006). En fibras de musgo (*Sphagnum magellanicum*) se demostraron que los mejores resultados de propiedades funcionales se consiguieron con tamaño de partículas de 0.42 mm de diámetro (Villarroel *et al.*, 2003).

La combinación de energía térmica y mecánica puede cambiar drásticamente la estructura de la fibra dietética en todo el nivel estructural que conduce posiblemente a nuevas propiedades funcionales. Sin embargo, procesos simples como el remojo y cocción tienden a modificar la composición y la disponibilidad de nutrientes, también modifican el material de la pared celular vegetal que puede tener importantes efectos fisiológicos (Dhingra *et al.*, 2012). El tratamiento enzimático puede modificar la proporción entre fibras solubles e insolubles, en tanto que los tratamientos químicos con soluciones ácidas o básicas aumentan la capacidad de hinchamiento. Esto se explica por la destrucción de la coherencia de las paredes celulares (Elleuch *et al.*, 2011).



## 2.6.1. PROCESO HIDROTÉRMICO

### 2.6.1.1. Generalidades

El tratamiento hidrotérmico promueve el rompimiento de celulosa, hemicelulosa, lignina, pectina y gomas, además propicia la interacción y enlace de estas sustancias con proteína y lípidos (Alfonzo, 2000). También puede cambiar la relación entre fibras insolubles y solubles, el contenido de fibra dietética total y sus propiedades físico-químicas. Estas modificaciones dependen del tipo de material de la planta y de la naturaleza del tratamiento (Torres *et al.*, 2006; Elleuch *et al.*, 2011).

Aguilar y Campos, (2003) concluyeron que el tratamiento térmico en agua durante 10 minutos a temperatura constante de 80 °C permitió obtener mejores propiedades fisicoquímicas de la fibra dietética de los residuos de naranja y salvado de cebada, sin embargo en la cáscara de camote fue el que se trató por 5 minutos.

Vilcanqui, (2009) sobre la base de un estudio en fibras proveniente de las hojas de *Agave tequilana* Weber, constató que el tratamiento térmico en agua a 90 °C, durante 15 minutos y relación de materia prima/agua de 1:2 (p/v) resultó ser el mejor parámetro de obtención de fibra en función de sus propiedades funcionales.

### 2.6.1.2. Definición del proceso hidrotérmico

Es un proceso físico que consiste en la modificación estructural del material lignocelulósico, utilizando agua a temperaturas elevadas (Miuki, 2005). Se fundamenta en el uso del agua como un vehículo para remover los compuestos solubles no deseables con la finalidad de incrementar el contenido de la fibra (Vilcanqui, 2009).



## 2.6.2. EXPANSIÓN POR EXPLOSIÓN

### 2.6.2.1. Generalidades

La tecnología de inflado o expansión fue desarrollada por Alexander P. Anderson en el año de 1900 y patentado en 1902 bajo el número de patente 707 892; en este proceso los granos de cereales se inflan por medio de pistolas. Se llama pistola a este equipo porque se asemeja a un antiguo cañón (Anderson, 1902; Maxwell y Holohan, 1999). En la actualidad el equipo es conocido como expansor tipo batch y la tecnología se denomina expansión por explosión (Hanco, 2010; Tacora *et al.*; 2010; Castro, 1987).

En el proceso de expansión por explosión los granos se cuecen, generalmente sin otro ingrediente, se ajustan a un contenido de humedad apropiado y se sellan en el expansor tipo batch. Esta consta de un cilindro horizontal que gira sobre su eje y donde hay quemadores de gas, o de otro tipo, colocados para calentar el exterior del cilindro. También está provista de medios para inclinar el cilindro para facilitar el proceso de carga y descarga de los granos. Un extremo del cilindro está permanentemente cerrado y el otro tiene una tapa que lo cierra y un sistema que permite su apertura en forma instantánea. La masa de granos gira en el interior del cilindro y se calienta en pocos minutos. Es presurizada por el aire caliente y por el vapor de su propia humedad. Cuando se obtiene la presión adecuada (entre 90 a 250 psi), la tapa se abre y el contenido sale en un sonido fuerte. Los granos de cereales se expanden por la volatilización súbita de la humedad interna (Maxwell y Holohan, 1999).

Castro, (1987) reportó un descenso de 5.84 a 3.53% de fibra cruda en granos de kiwicha causado por incremento de presión en un intervalo de 20 lbf/plg<sup>2</sup>,



mientras Tacora, (2010) y Sucari, (2003) en granos cañihua variedad cupi reportaron disminución de 6.91 a 6.05% y 9.83 a 1.10%, respectivamente, considerando variaciones de presión en rangos de 20, 30 y 40 lbf/plg<sup>2</sup>. Sin embargo, no se estudiaron los efectos de la presión sobre las propiedades funcionales de los productos.

#### **2.6.2.2. Definición de expansión por explosión**

Es un proceso de caída de presión que involucra una repentina transferencia de masa de vapor sobrecalentado en un espacio de baja presión (Tacora, 2010).

El Fenómeno de expansión resulta de la repentina expansión de vapor de agua (agua en estado gaseoso), en los intersticios del gránulo; la partícula es limitada en su estado de hinchamiento como deshidratación consecuencia de la rápida difusión de vapor de agua fuera de ella. El fenómeno de expansión puede ser efecto físico o lógico de un aumento aparente de volumen de 8 a 16 veces con relación al trigo, unas 6 a 8 veces con relación al arroz (Sucari, 2003).

### III. PARTE EXPERIMENTAL

#### 3.1. LUGAR DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación fue desarrollado en la provincia de Abancay de la región Apurímac entre los meses de Agosto del 2011 a Abril del 2012, en los laboratorios de Química, Operaciones Unitarias y Procesamiento de Productos Agroindustriales de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Agroindustrial en la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac.

#### 3.2. MATERIA PRIMA, EQUIPOS, MATERIALES Y REACTIVOS

##### 3.2.1. MATERIA PRIMA

La materia prima utilizada para esta investigación, fue las hojas de maguey (*Agave americana*) procedente del sector de Villa Gloria Alta, Distrito y Provincia de Abancay en la región Apurímac, recolectadas en los meses de setiembre y octubre de 2011, se encuentra ubicado a una altitud de 2510 m.s.n.m.

##### 3.2.2. EQUIPOS E INSTRUMENTOS

- Autoclave industrial.
- Balanza analítica, marca OHAUS (Adventurer™), capacidad máxima 210 g.
- Balanza digital, marca M&D, modelo KD-TACD-30, capacidad máxima 30 Kg.
- Balanza digital, marca OHAUS, capacidad máxima 3000 g.
- Baño de maría.
- Centrífuga LW Scientific, modelo LW-U8V Ultra 8V, 10.9 cm de radio de rotor.
- Destilador de agua.
- Estufa, marca MEMMERT, modelo 200-800, rango (30°C ~ 250°C).
- Expansor tipo Batch, marca ELEPHANT.



- Licuadora industrial.
- Molino de disco de laboratorio, marca GP DISK MILL, modelo FFC-15
- Mufla, marca BARNSTEAD THERMOLYNE, modelo FB1410M, rango (0°C ~ 1100 °C).
- Potenciómetro portátil, marca ATC.
- Secador lecho fluidizado industrial.
- Sellador eléctrico.
- Termómetro de mercurio.
- Termómetro digital, marca FRASEK, modelo PR-902C, rango (-50°C ~ 750°C).

### 3.2.3. MATERIALES

- Balde graduado de 10 litros.
- Bolsa F57-ANKOM de Ankom Technology, Estados Unidos.
- Bolsas de polipropileno.
- Cilindro graduado de 10 mL, diámetro 0.8 mm.
- Cocina eléctrica y a gas.
- Colador de acero inoxidable.
- Crisol.
- Cronómetro.
- Cuchillo de acero inoxidable.
- Desecador de vacío.
- Embudo de vástago largo.
- Envases de 0.5 litros con tapa rosca.
- Espátula.

- Frasco de vidrio de 3 litros.
- Marcador de laboratorio.
- Olla de acero inoxidable de 10 litros, 20 litros y 30 litros.
- Pipeta volumétrica de 10 mL.
- Placas petri
- Probetas volumétricas de 50 mL, 200 mL.
- Propipeta.
- Tamiz de acero inoxidable N° 10 (2 mm), marca Retsch®, modelo 3161.
- Tubos graduados de centrifuga de 15 mL.
- Vagueta.
- Vasos precipitados de 10 mL, 100 mL y 1000 mL.

#### 3.2.4. REACTIVOS

- Aceite de maíz de Arcor, Argentina.
- Acetona.
- Ácido clorhídrico [HCl]
- Ácido etilendiaminotetracético [ $C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8 \cdot 2H_2O$ ] de Merck, Alemania.
- Ácido sulfúrico [ $H_2SO_4$ ] 98%.
- Agua destilada.
- Alfa amilasa de Ankom Technology, Estados Unidos.
- Bromuro de cetyl trimetil amonio [ $C_{16}H_{33}N(CH_3)_3Br$ ] de Merck, Alemania.
- Fosfato di sódico anhidro [ $Na_2HPO_4$ ] de Merck, Alemania
- Hidróxido de sodio [NaOH] p.a. de Merck, Alemania.
- Sulfato lauril sódico [ $C_{12}H_{25}OSO_2ONa$ ] de Merck, Alemania.

- Sulfito de sodio [ $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ] de Merck, Alemania
- Tetraborato de sodio decahidratado [ $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ] de Merck, Alemania.
- Trietilenglicol [ $\text{HO}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_3\text{H}$ ] de Merck, Alemania.

### 3.2.5. INDUMENTARIA

- Gorra.
- Guantes quirúrgicos.
- Guantes de cuero.
- Lentes de protección, marca Spro STARTEC.
- Mandil.
- Respirador RS-1000, marca Securindustria, modelo RS-1000.

### 3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

La recolección de hojas se realizó mediante el muestreo no probabilístico a partir de las plantas de 7 a 8 años de madurez, siendo el indicador de madurez la ausencia de inflorescencia. Además, se cortaron aquellas hojas ubicadas entre la parte superior e inferior de la altura total de la planta, permitiendo que éstas sean lo más homogéneo posible en sus características morfológicas.

### **3.4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

#### **3.4.1. MATERIA PRIMA**

##### **3.4.1.1. Hoja del maguey**

Las hojas del maguey utilizados en el presente trabajo fueron separados de los que presentaban signos deterioro quedando libres de golpes, magulladuras, cicatrices, rajaduras y manchas oscuras.

##### **3.4.1.2. Cuantificación de fibra detergente neutro y propiedades funcionales de la materia prima**

Antes de realizar los procesos de obtención de fibra de las hojas del maguey mediante el método hidrotérmico y expansión por explosión, se procedió a determinar las propiedades funcionales por parámetros físicos y la cuantificación de fibra detergente neutro de la materia prima, siendo ésta como muestra control o blanco para luego comparar. La fibra de la materia prima fue obtenida siguiendo las operaciones preliminares del Ítem 3.4.2.1, seguido del licuado, escurrido y secado en lecho fluidizado a 45 °C durante una hora.

#### **3.4.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE FIBRA MEDIANTE EL MÉTODO HIDROTÉRMICO Y EXPANSIÓN POR EXPLOSIÓN**

El diagrama de flujo del proceso experimental para la obtención de fibra de las hojas del maguey por los dos métodos se muestra en la Figura 5 y se detalla a continuación.



### 3.4.2.1. Operaciones preliminares

Estas operaciones se realizaron tanto para la obtención de fibra mediante el proceso hidrotérmico y expansión por explosión, y comprende las operaciones del lavado, cortado, pelado y troceado de las hojas del maguey.

Las hojas del maguey seleccionadas fueron lavadas manualmente bajo fricción y con agua potable a temperatura ambiente con la finalidad de retirar restos de tierra y la eliminación de cualquier tipo de materia extraña adheridas a la superficie de la hoja. Posteriormente se cortaron transversalmente en proporciones de 6 a 8 cm de longitud para facilitar la manipulación del pelado utilizando guantes de cuero y cuchillo de acero inoxidable. Luego se eliminaron la cutícula (superficie externa) de ambos lados y espinas de los bordes de las hojas, en este proceso se utilizaron guantes quirúrgicos para evitar la irritación de la piel en contacto directo con los metabolitos orgánicos, asimismo lentes y mascarilla de protección contra gases irritantes que se desprenden de la cutícula. Después se cortaron transversalmente en trozos de 1 a 2 cm de ancho, seguido de otro corte transversal en diagonal de 0.5 a 1 cm de espesor. La finalidad de esta operación es facilitar el triturado de las fibras en la operación de licuado.

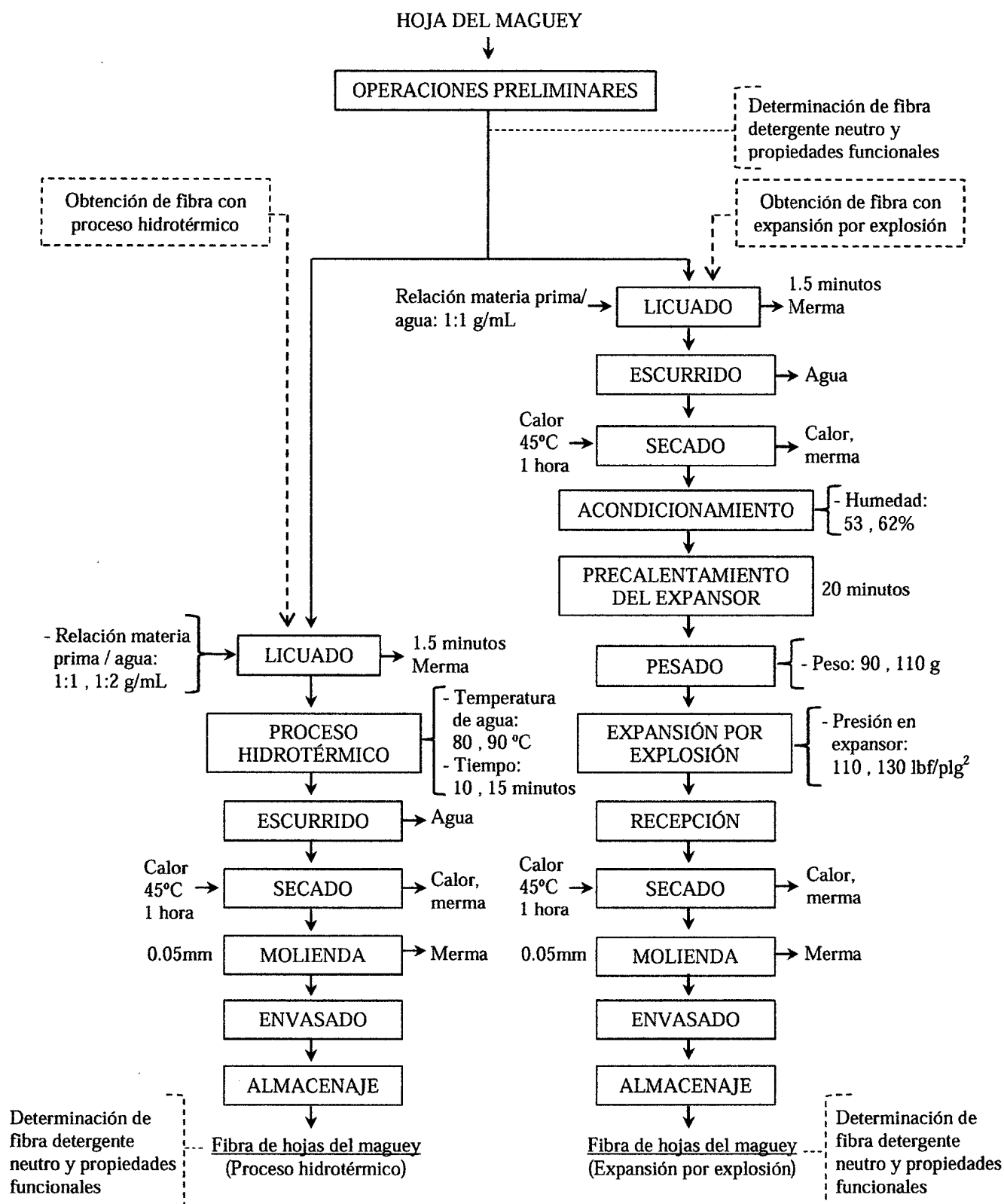


Figura 5. Diagrama de flujo experimental para obtención de fibra a partir de las hojas del maguey mediante proceso hidrotérmico y expansión por explosión

### **3.4.2.2. Obtención de fibra mediante proceso hidrotérmico**

#### **A. Licuado**

En esta operación se planteó el estudio de 2 niveles de relación de materia prima y agua, para lo cual los trozos provenientes de la hoja de maguey se procedieron a triturar en una licuadora industrial adicionando agua destilada en una relación de 1:1 y 1:2 de materia prima (p/v). El proceso de licuado duró 2 minutos en todas las unidades experimentales con el fin de reducir en tamaños homogéneos el residuo fibroso húmedo y separar el extracto líquido de las hojas del maguey.

#### **B. Proceso hidrotérmico**

En este proceso se estudió la variación de la temperatura de agua y tiempo de inmersión en 2 niveles, siendo el principal objetivo la remoción de los compuestos solubles no deseables para incrementar el contenido de la fibra detergente neutro. La fibra licuada fue trasvasado en una olla de acero inoxidable de 20 litros, luego se sometió en baño maría dentro de un autoclave industrial. Las temperaturas de agua que se estudiaron fueron de 80 y 90 °C, durante 10 y 15 minutos, siendo mantenida constante y controlada con un termómetro digital provisto de un sensor que se colocó en el centro de la olla.

#### **C. Escurrido**

La fibra tratada fue escurrido manualmente utilizando un lienzo en un recipiente de acero inoxidable previamente esterilizado. Este proceso se realizó con la finalidad de eliminar el agua y otros compuestos hidrosolubles.



#### **D. Secado**

Esta operación se realizó en un secador de lecho fluidizado, para lo cual el residuo fibroso húmedo, se procedió a dispersar manualmente sobre la bandeja del lecho, luego se graduó el ingreso del corriente de aire forzado a una temperatura constante de 45 °C durante una hora. El secado en lecho fluidizado fue aislado para cada unidad experimental.

#### **E. Molienda**

El objetivo principal de esta operación fue la reducción del tamaño de la fibra seca. Debido a la dureza de las fibras, la molienda se realizó en dos etapas mediante un molino de disco de laboratorio; primero se sometió a la reducción del tamaño hasta que las partículas molidas pasaron por el tamiz N° 18 (1 mm de diámetro), luego por medio del tamiz N° 35 (0.5 mm de diámetro).

#### **F. Envasado**

Con la finalidad de guardar y mantener estable, las muestras de fibra fueron envasadas en frascos de polietileno de alta densidad con tapa de rosca.

#### **G. Almacenaje**

El producto envasado fue almacenado en una caja de cartón a temperatura ambiente para su próximo análisis del contenido de fibra detergente neutro y propiedades funcionales por parámetros físicos, siendo utilizados de acuerdo al avance de investigación.



### 3.4.2.3. Obtención de fibra con expansión por explosión

#### A. Licuado

Una vez obtenida los trozos de la hoja de maguey, se procedió a triturar en una licuadora industrial adicionando agua destilada en una relación de 1:1 de materia prima (p/v). El proceso de licuado duró 2 minutos en todas las unidades experimentales con el fin de reducir en tamaños homogéneos.

#### B. Ecurrido

La fibra tratada se procedió a escurrir manualmente utilizando un lienzo en un recipiente de acero inoxidable previamente esterilizado. Éste proceso se realizó con la finalidad de eliminar el agua.

#### C. Secado

Las fibras escurridas fueron dispersados manualmente sobre la bandeja del lecho fluidizado, luego se graduó el ingreso del corriente de aire forzado a una temperatura constante de 45 °C durante una hora. El secado en lecho fluidizado fue aislado para cada unidad experimental.

#### D. Acondicionamiento

Siguiendo el Método 925.09 del AOAC International, (2002) que se detalla en el Anexo 13 se determinó la humedad de 5.94% de las muestras provenientes del secado. Posteriormente se realizó ensayos preliminares de acondicionamiento de humedad mediante cálculos de balance de materia. Luego de varios ensayos se plantearon el estudio de 53 y 62% de humedad, para lo cual se adicionaron agua en función del peso de fibra.

### **E. Pre calentamiento del expansor**

El expansor tipo batch fue previamente limpiado para luego ser calentado durante 30 minutos en un movimiento constante.

### **F. Pesado**

En esta operación se plantearon el estudio de 2 diferentes cantidades de fibras que fueron introducidas en el expansor y determinadas previos ensayos preliminares en función del mantenimiento del color natural de la fibra y libre de quemaduras. Se pesaron 90 y 110 g de fibra de maguey y se alimentaron independientemente a la cámara del expansor tipo batch mediante un embudo metálico, en seguida cerrando herméticamente la tapa del expansor.

### **G. Expansión por explosión**

En esta etapa se experimentó 2 niveles de presión en el expansor tipo batch, con la finalidad de alterar y debilitar la compleja estructura de la masa lignocelulósica de las hojas del maguey. Para este proceso el expansor se calentó hasta obtener las presiones de 110 y 130 lbf/plg<sup>2</sup> cada uno de manera independiente, luego se abrió la tapa, y es cuando se produce una caída de presión, inmediatamente las fibras salen de manera explosiva.

### **H. Recepción**

Mediante una lienzo previamente extendida en la sala de expandido se recolectaron la fibra tratada, posteriormente se dispuso en bolsas confeccionadas de lienzo con la finalidad de evitar su pérdida en el proceso de secado en lecho fluidizado.

### **I. Secado**

Se procedió a colocar las bolsas de lienzo contenidas de fibra sobre la bandeja del lecho fluidizado, inmediatamente se graduó el ingreso del corriente de aire forzado a una temperatura constante de 45 °C durante una hora.

### **J. Molienda**

El objetivo principal de esta operación fue la reducción del tamaño de la fibra seca. Debido a la dureza de las fibras, la molienda se realizó en dos etapas mediante un molino de disco de laboratorio; primero se sometió a la reducción del tamaño hasta que las partículas molidas pasaron por el tamiz N° 18 (1 mm de diámetro), luego por medio del tamiz N° 35 (0.5 mm de diámetro).

### **K. Envasado**

Con la finalidad de guardar y mantener estable, las muestras de fibra fueron envasadas en frascos de polietileno de alta densidad con tapa de rosca.

### **L. Almacenaje**

El producto envasado fue almacenado en una caja de cartón a temperatura ambiente para su próximo análisis del contenido de fibra detergente neutro y propiedades funcionales por parámetros físicos, siendo utilizados de acuerdo al avance de investigación.



### **3.5. MÉTODOS DE ANÁLISIS**

#### **3.5.1. CUANTIFICACIÓN DE FIBRA POR MÉTODOS DETERGENTES**

##### **3.5.1.1. Determinación de fibra detergente neutro**

Se determinó de acuerdo al método de Van Soest *et al.*, (1991) descrito por Ankom Technology, (2008a).

###### **3.5.1.1.1. Fundamento**

Tratamiento de muestra con solución detergente en caliente para cuantificar el grupo de fibras insolubles compuestos por celulosa, hemicelulosa y lignina a una solución de pH neutro.

###### **3.5.1.1.2. Preparación de solución fibra detergente neutro**

La solución fibra detergente neutro se preparó en base de 1 litro de agua destilada y conforme a la composición de reactivos que se muestra en el Tabla 3. La preparación de la solución detergente se inició con la mezcla de ácido etilendiaminotetracético y tetraborato de sodio decahidratado en 150 mL de agua destilada. Paralelamente en otro vaso precipitado, el fosfato disódico anhidro se disolvió calentando en 20 mL de agua destilada; posteriormente las dos soluciones fueron mezcladas mientras estaban calientes y luego se transfirió en un frasco de 3 litros.

Por otro lado, el sulfato lauril sódico se disolvió en 200 mL de agua destilada, seguidamente se agregó en un frasco de 3 litros por medio de un embudo de vástago largo de manera que llegue al fondo. Finalmente se añadieron el agua restante a un litro y el trietilenglicol para evitar la formación de espuma. Al día

siguiente, se midió el pH, el que debe estar entre 6.9 y 7.1, de lo contrario fueron ajustados con hidróxido de sodio o ácido clorhídrico.

Tabla 3. Composición de reactivos de fibra detergente neutro

Reactivos	Fórmula molecular	Cantidad
Agua destilada	H <sub>2</sub> O	1.00 litro
Sulfato lauril sódico	C <sub>12</sub> H <sub>25</sub> OSO <sub>2</sub> ONa	30.00 g
Ácido etilendiaminotetracético [EDTA]	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> N <sub>2</sub> Na <sub>2</sub> O <sub>8</sub> *2H <sub>2</sub> O	18.61 g
Trietilenglicol	HO(CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> O) <sub>3</sub> H	10.00 mL
Tetraborato de sodio decahidratado	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> *10H <sub>2</sub> O	6.81 g
Fosfato disódico anhidro	Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	4.56 g

Fuente: Ankom Technology, (2008a).

### 3.5.1.1.3. Procedimiento

Las bolsas de filtración F57-ANKOM se codificaron y se pesaron en balanza analítica para registrar el peso (W1). A continuación se pesaron entre 0.45 - 0.55 gramos de muestra dentro de la bolsa de filtración registrándose el peso como W2. Una vez pesado, el borde de las bolsas fueron selladas térmicamente. Al mismo tiempo por cada lote experimental, fueron incluidas una bolsa de filtración vacía como blanco, registrándose el peso inicial para determinar la relación con el peso final una vez terminado el proceso de digestión y secado (C1). Seguidamente las bolsas se colocaron en un contenedor de digestión, acondicionado para 24 muestras. Luego se añadieron entre 1900 a 2000 mL de solución neutro detergente, además de 20 gramos de sulfito de sodio y 4 mL de alfa amilasa sobre la solución.



Se procedió la digestión en baño de maría a una temperatura de  $100 \pm 0.5$  °C, durante 75 minutos. Terminada esta operación se lavó por tres veces con agua destilada entre una temperatura de 70 a 90 °C en el mismo contenedor. Una vez extraída las bolsas se lavaron con acetona por un tiempo de 3 a 5 minutos y posteriormente fueron secados en estufa a  $102 \pm 2$  °C por un tiempo de 2 a 4 horas, transcurrido el tiempo se registró el peso (W3). El porcentaje de fibra detergente neutro se calculó según la siguiente fórmula:

$$\% \text{ FDN} = \frac{(W3 - (W1 \times C1))}{W2} \times 100$$

Donde;

FDN: Fibra detergente neutro.

W1: Peso de bolsa F57-ANKOM.

W2: Peso de la muestra.

W3: Peso de la bolsa F57-ANKOM y la muestra seca después de la digestión.

C1: Relación del peso final y el peso inicial de la bolsa F57-ANKOM en blanco.

### 3.5.1.2. Determinación de fibra detergente ácida

La determinación del contenido de fibra detergente ácida, se realizó conforme al método de Van Soest *et al.*, (1991) descrito por Ankom Technology, (2008b).

#### 3.5.1.2.1. Fundamento

Digestión de muestras con solución fibra detergente ácida preparada en base de bromuro de cetil trimetil amonio (CTAB) y ácido sulfúrico. El residuo que permanece después de la digestión son predominantemente la celulosa y lignina.



### 3.5.1.2.2. Procedimiento

Primero se preparó la solución de fibra detergente ácida disolviendo 20 g de bromuro de cetil trimetil amonio en 1 litro de ácido sulfúrico a 1.00 *N*. Una vez preparada la solución, se pesó entre 0.44 - 0.55 g de muestra dentro de las bolsas F57-ANKOM, luego se sellaron. Posteriormente, se introdujo las bolsas en un contenedor de digestión y se añadieron 100 mL de solución detergente ácida por unidad de bolsa; dicha digestión se realizó a 100 °C durante 60 minutos en baño de maría.

Transcurrido el tiempo, las bolsas fueron lavadas con agua caliente de 70 – 90 °C, seguido del lavado con acetona y luego secado a  $102 \pm 2$  °C por un tiempo de 2 a 4 horas. El residuo fue pesado y cuantificado mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ FDA} = \frac{(W3 - (W1 \times C1))}{W2} \times 100$$

Donde;

FDA: Fibra detergente ácida.

W1: Peso de bolsa F57-ANKOM.

W2: Peso de la muestra.

W3: Peso de la bolsa F57-ANKOM y la muestra seca después de la digestión.

C1: Relación del peso final y peso inicial de la bolsa F57-ANKOM en blanco.

### 3.5.1.3. Determinación de lignina detergente ácida

El contenido de lignina se determinó siguiendo el método de Tejada, (1992) descrito por Vilcanqui, (2009).



### 3.5.1.3.1. Fundamento

Digestión de muestras provenientes del tratamiento con fibra detergente ácido en una solución de ácido sulfúrico de alta concentración.

### 3.5.1.3.2. Procedimiento

En este proceso, las muestras provenientes del residuo de la digestión de fibra detergente ácida (celulosa y lignina) fueron sometidos a la digestión en una solución de ácido sulfúrico al 72% de concentración, por un tiempo de 3 horas, luego se lavó con agua destilada hasta obtener un pH neutro, además del uso de acetona. Seguidamente las muestras fueron secadas a  $102 \pm 2$  °C durante 4 horas y se registraron su peso (L1). Por último, las muestras fueron incineradas en una mufla por 4 horas a una temperatura de 525 °C, se dejó enfriar hasta 220 °C y los crisoles se transfirieron a la estufa hasta los 90 °C, después al desecador. Una vez completado el proceso de enfriamiento se pesó los crisoles conteniendo el residuo (L2). La lignina fue cuantificada por la siguiente fórmula:

$$\% \text{ LDA} = \frac{L1 - L2}{S} \times 100$$

Donde;

LDA: Lignina detergente ácida.

L1: Peso de la muestra seca después del tratamiento con ácido sulfúrico al 72% de concentración (lignina y ceniza).

L2: Peso del residuo después de la ignición (ceniza).

S: Peso de muestra inicial de fibra detergente ácida.



### 3.5.2 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FUNCIONALES

#### 3.5.2.1. Determinación de capacidad de absorción de agua

Se empleó la metodología de Tamayo y Bermúdez, (2002) descrita por Vilcanqui, (2009).

##### 3.5.2.1.1. Procedimiento

Se pesó 500 miligramos de muestra y se dispersó en tubos de centrifuga que contenía 10 mL de agua destilada, agitando manualmente durante 30 minutos. Inmediatamente, las muestras fueron centrifugadas durante 10 minutos a 3000 RPM, luego se retiró el sobrenadante y se pesó el sedimento. Los resultados se expresaron en gramos de agua absorbida por gramo de materia seca y se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{CAA (g/g)} = \frac{\text{Peso de sedimento} - \text{Peso de muestra}}{\text{Peso de muestra}}$$

Donde;

CAA: Capacidad de absorción de agua.

#### 3.5.2.2. Determinación de capacidad de retención de agua

La capacidad de retención de agua fue determinada siguiendo el método de Robertson *et al.*, (2000).

##### 3.5.2.2.1. Procedimiento

Se pesó 500 mg de muestra en tubos graduados de centrifuga, luego se adicionó 10 mL de agua destilada y se agitó con cuidado. La muestra se hidrató dejando en reposo a temperatura ambiente durante 18 horas y se centrifugaron a  $3000 \times g$



durante 20 minutos (4962 RPM en Centrifuga LW Scientific), inmediatamente se separó la solución sobrenadante invirtiendo el tubo y se dejó drenar por 10 minutos. El residuo hidratado se pesó, posteriormente fue secado en estufa a 120 °C durante 4 horas para obtener el peso seco. La capacidad de retención de agua se cuantificó como gramos de agua retenida por gramo de muestra y se calculó según la siguiente fórmula:

$$\text{CRA (g/g)} = \frac{\text{Peso de residuo hidratado} - \text{Peso de residuo seco}}{\text{Peso de residuo seco}}$$

Donde;

CRA: Capacidad de retención de agua.

### 3.5.2.3. Determinación de capacidad de hinchamiento

Se realizó de acuerdo al método descrito por Valencia y Román, (2006).

#### 3.5.2.3.1. Procedimiento

Se colocó 200 mg de cada muestra en un cilindro graduado de diez mililitros y se midió el volumen ocupado por las fibras ( $V_0$ ). A continuación se añadió 10 mL de agua destilada y se agitó manualmente durante 5 minutos. Se dejó en reposo en una superficie nivelada durante 24 horas a temperatura ambiente. Posteriormente sin retirar el agua, se midió el volumen final de las muestras ( $V_1$ ).

La capacidad de hinchamiento se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$CH \text{ (mL/g)} = \frac{V_1 - V_0}{\text{Peso de muestra}}$$

Donde;

CH: Capacidad de hinchamiento.

Vo: Volumen inicial ocupado por la fibra seca.

V1: Volumen final de la fibra hidratada.

#### 3.5.2.4. Capacidad de absorción de grasa

La capacidad de absorción de grasa se determinó utilizando el método de Caprez *et al.*, (1986); ligeramente modificado por Zhang *et al.*, (2010).

##### 3.5.2.4.1. Procedimiento

Se pesó 500 mg de muestra en tubos de centrifuga, se añadió 10 mL de aceite de maíz y se homogenizó la mezcla, luego se dejó durante 18 horas a temperatura ambiente. Posteriormente, se centrifugó las muestras a 1500 *x g* durante 30 minutos (3508 RPM en Centrífuga LW Scientific), pasado este tiempo se separó el sobrenadante invirtiendo el tubo y se dejó drenar por 10 minutos, transcurrido el tiempo se pesó el residuo. La capacidad de absorción de grasa se expresa como gramos de aceite absorbidos por gramo de muestra seca.

Siguiendo la siguiente fórmula se determinó la capacidad de absorción de grasa:

$$\text{CAG (g/g)} = \frac{\text{Peso de residuo} - \text{Peso de muestra}}{\text{Peso de muestra}}$$

Donde;

CAG: Capacidad de absorción de grasa.

### 3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

#### 3.6.1. FACTORES DE ESTUDIO Y VARIABLES DE RESPUESTA

Se estudiaron tres factores en dos métodos de obtención de fibra de las hojas del maguey, el proceso hidrotérmico y expansión por explosión; en ambos métodos dos niveles por cada factor. Las variables de respuesta en los dos métodos fueron las propiedades funcionales y la fibra cuantificada por métodos detergentes tal como se indica en la Tabla 4.

Tabla 4. Niveles de los factores de estudio y variables de respuesta de la investigación

Métodos de obtención de fibra	Factores de estudio	Niveles de factor	Variable de respuesta
Proceso hidrotérmico	Temperatura de agua (°C)	80, 90	- Cap. de absorción de agua (g/g)
	Tiempo de inmersión (minuto)	10, 15	- Cap. de retención de agua (g/g)
	Relación M: agua (g-mL)	1:1, 1:2	- Cap. de hinchamiento (mL/g)
Expansión por explosión	Presión en expansor (lbf/plg <sup>2</sup> )	110, 130	- Cap. de absorción de grasa (g/g)
	Humedad de fibra (%)	53, 62	- Fibra detergente neutro (%)
	Peso de fibra (g)	90, 110	- Fibra detergente ácida (%)
			- Lignina detergente ácida (%)

Fuente: Elaboración propia

### 3.6.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

El método estadístico que se empleó para el análisis y discusión de resultados fue el diseño factorial  $2^3$ , que estudia tres factores en dos niveles cada uno, en total comprende 8 tratamientos (Gutiérrez y De la Vara, 2004). Para cada tratamiento se realizaron 3 repeticiones, resultando 24 unidades experimentales por cada método de obtención de fibra y su esquema correspondiente del diseño experimental se muestran en el Anexo 18 y 19.

Los resultados obtenidos se procesaron empleando el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{ijkl} = \mu + A_i + B_j + C_k + (AB)_{ij} + (AC)_{ik} + (BC)_{jk} + (ABC)_{ijk} + \epsilon_{ijkl}$$

Donde;

$Y_{ijkl}$  = Variable de respuesta de la l-ésima observación.

$\mu$  = Media general, media de la población a la que pertenecen las observaciones.

$A_i$  = Efecto del i-ésimo nivel del factor A;  $i=1, \dots, a$  (niveles de factor A).

$B_j$  = Efecto del j-ésimo nivel del factor B;  $j=1, \dots, b$  (niveles de factor B).

$C_k$  = Efecto del k-ésimo nivel del factor C;  $k=1, \dots, c$  (niveles de factor C).

$(AB)_{ij}$  = Efecto de la interacción entre los factores A, B.

$(AC)_{ik}$  = Efecto de la interacción entre los factores A, C.

$(BC)_{jk}$  = Efecto de la interacción entre los factores B, C.

$(ABC)_{ijk}$  = Efecto de la interacción entre los factores A, B, C.

$\epsilon_{ijkl}$  = Efecto del error experimental.



### 3.6.3. ANÁLISIS DE DATOS

Mediante el modelo estadístico, los datos obtenidos de las variables de respuesta se sometieron al análisis de varianza multifactorial para inferir la influencia de los factores de estudio y la interacción de los mismos, con un nivel de confianza de 95%. Además, se elaboraron gráficos de efectos principales y de interacciones para observar el comportamiento de los factores en estudio sobre las variables de respuesta. Posteriormente se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey al 5% de significancia, con la finalidad de identificar y seleccionar el tratamiento con mejores propiedades funcionales y mayor contenido de fibra detergente neutro.

Para determinar el mejor método de obtención de fibra, los resultados de las propiedades funcionales y contenido de fibra detergente neutro del mejor tratamiento seleccionado, tanto del proceso hidrotérmico y expansión por explosión se compararon mediante la prueba de *t de student* para muestras independientes. En tanto para la comparación con la fibra de las hojas del maguey sin aplicación de los métodos de obtención (grupo de control o blanco) se utilizó la prueba de *t de Dunnett*, ambas comparaciones se realizaron con un nivel de confianza de 95%.

Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software estadístico Statgraphics Centurion versión 16.1.11 (StatPoint Technologies, 2010) y PASW versión 18.0.0 (SPSS, 2009), ambos para sistema operativo Windows.



En todos los análisis estadísticos, las condiciones de decisión de las hipótesis fueron los siguientes:

- Si P-valor  $< \alpha$ , o su equivalente  $F_{\text{cal}} > F_{\text{tab}}$ , se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula.
- Si P-valor  $> \alpha$ , o su equivalente  $F_{\text{cal}} < F_{\text{tab}}$ , se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna.

Donde;

$\alpha = 0.05$  de nivel de significancia para ambos casos.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. ANÁLISIS PRELIMINARES

#### 4.1.1. Determinación de propiedades funcionales por métodos físicos

Los resultados de los valores de las propiedades funcionales de la fibra de hojas del maguey utilizada en el presente trabajo sin aplicación del método de obtención de fibra se muestran en la Tabla 5. En las revisiones bibliográficas no se reportaron estudios de propiedades funcionales en el maguey tampoco en otras especies del género *Agave*.

Tabla 5. Valores de las propiedades funcionales de la fibra de hojas del maguey

Capacidad de absorción de agua (g/g)	Capacidad de retención de agua (g/g)	Capacidad de hinchamiento (mL/g)	Capacidad de absorción de grasa (g/g)
6.73 ± 0.03	7.64 ± 0.06	6.73 ± 0.00	3.67 ± 0.02

Valores de media ± desviación estándar de 3 repeticiones.

#### 4.1.2. Cuantificación de fibra por métodos detergentes

El contenido de fibra detergente neutro y sus respectivos componentes en base seca de la fibra de hojas del maguey utilizada en el presente trabajo sin aplicación del método de obtención de fibra se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Componentes de fibra detergente neutro de la fibra de hojas del maguey

Fibra detergente neutro (%) <sup>Ψ</sup>	Celulosa (%) <sup>£</sup>	Hemicelulosa (%) <sup>λ</sup>	Lignina (%) <sup>ϕ</sup>
57.99 ± 0.71	53.50	3.22	1.27

<sup>Ψ</sup> Valores de media ± desviación estándar de 3 repeticiones.

<sup>£</sup> Celulosa = FDA - LDA

<sup>λ</sup> Hemicelulosa = FDN - FDA

<sup>ϕ</sup> Lignina = LDA



## 4.2. OBTENCIÓN DE FIBRA MEDIANTE PROCESO HIDROTÉRMICO

### 4.2.1. Determinación de propiedades funcionales por métodos físicos

#### 4.2.1.1. Capacidad de absorción de agua

En el Tabla 7 se muestran los resultados de la capacidad de absorción de agua (CAA) provenientes de diferentes tratamientos como resultado de la combinación de tres parámetros: temperatura de agua (T), tiempo de inmersión (t) y relación de materia prima: agua (R); los valores fluctuaron de 6.17 hasta 7.32 g de agua/g de fibra.

El análisis de varianza del Anexo 2.3 indica que la T, t, R y las interacciones influyen significativamente sobre la capacidad de absorción de agua ( $P < 0.05$ ), excepto la interacción txR. En el gráfico de efectos principales e interacción de factores del Anexo 2.4 y 2.5 se observa que el efecto de incrementar la temperatura y relación de materia prima: agua de 80 a 90 °C y 1:1 a 1:2 (p/v) respectivamente, aumenta la capacidad de absorción de agua siempre y cuando el tiempo de inmersión es prolongado a 15 minutos; porque si el tiempo se encuentra en su nivel bajo (10 minutos) ocurre un efecto negativo. Al parecer el incremento del tiempo de inmersión de fibra promueve el mejoramiento de la capacidad de absorción de agua, lo cual podría deberse a la mayor remoción de los compuestos solubles, liberación y aumento de la hemicelulosa (Tabla 8), así como la generación de la propiedad hidrofílica de la celulosa por la desintegración parcial de las zonas cristalinas, por tanto conferir mayor capacidad de absorción de agua (Fennema, 2000; BeMiller y Whistler, 2000). Otro factor influyente se atribuye al tamaño de partícula (Raghavendra *et al.*, 2004).

Tabla 7. Valores de las propiedades funcionales de la fibra de hojas del maguey obtenidas con proceso hidrotérmico

Tratamiento	Parámetros de estudio			Propiedades funcionales <sup>§</sup>			
	Temperatura de agua (°C)	Tiempo de inmersión (minuto)	Relación materia prima : agua (g, mL)	CAA (g/g)	CRA (g/g)	CH (mL/g)	CAG (g/g)
Control				6.73 ± 0.03	7.64 ± 0.06	6.73 ± 0.00	3.67 ± 0.02
1	80	10	1:1	6.35 ± 0.05 <sup>f</sup>	8.50 ± 0.06 <sup>d</sup>	7.73 ± 0.01 <sup>f</sup>	3.26 ± 0.04 <sup>c</sup>
2	90	10	1:1	6.17 ± 0.04 <sup>g</sup>	9.81 ± 0.05 <sup>a</sup>	9.24 ± 0.03 <sup>c</sup>	3.24 ± 0.03 <sup>cd</sup>
3	80	15	1:1	6.49 ± 0.02 <sup>e</sup>	8.96 ± 0.06 <sup>bcd</sup>	7.24 ± 0.01 <sup>g</sup>	3.25 ± 0.02 <sup>cd</sup>
4	90	15	1:1	6.64 ± 0.05 <sup>d</sup>	9.46 ± 0.06 <sup>ab</sup>	8.73 ± 0.01 <sup>e</sup>	3.25 ± 0.04 <sup>c</sup>
5	80	10	1:2	6.85 ± 0.06 <sup>bc</sup>	9.34 ± 0.06 <sup>abc</sup>	9.01 ± 0.04 <sup>d</sup>	3.15 ± 0.07 <sup>d</sup>
6	90	10	1:2	6.76 ± 0.06 <sup>cd</sup>	8.84 ± 0.59 <sup>cd</sup>	10.47 ± 0.01 <sup>a</sup>	3.74 ± 0.04 <sup>b</sup>
7	80	15	1:2	6.92 ± 0.03 <sup>b</sup>	9.71 ± 0.07 <sup>a</sup>	9.23 ± 0.01 <sup>c</sup>	3.30 ± 0.02 <sup>c</sup>
8	90	15	1:2	7.32 ± 0.04 <sup>a</sup>	9.65 ± 0.05 <sup>a</sup>	9.94 ± 0.05 <sup>b</sup>	4.02 ± 0.02 <sup>a</sup>

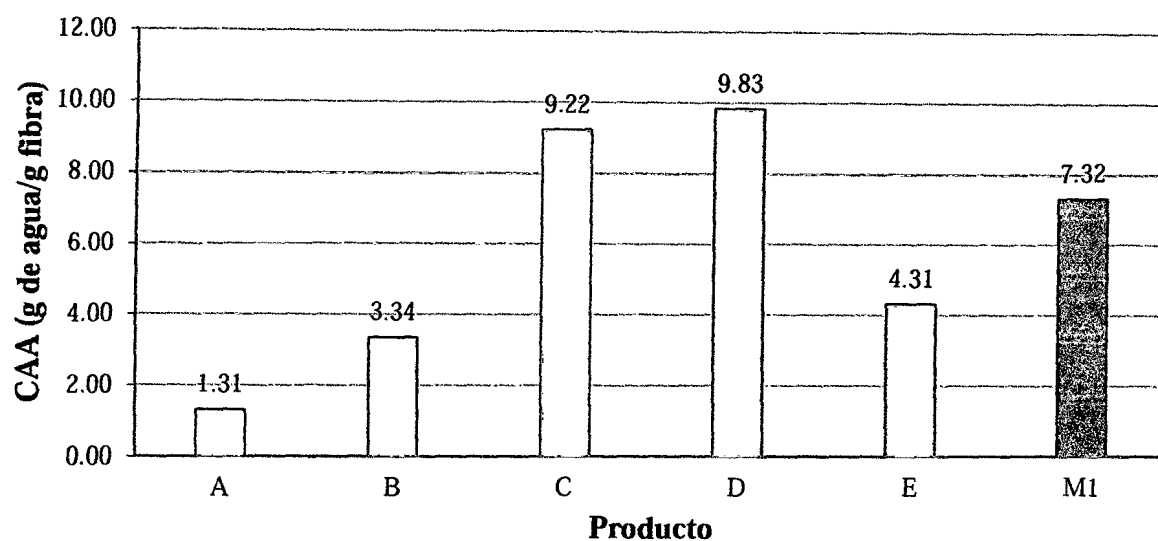
<sup>a, b, c, d, e, f, g</sup> Datos expresados como media ± desviación estándar (n=3). Valores en la misma columna con letras diferentes indican diferencias significativas estadísticamente entre los ocho tratamientos a un nivel de  $P \leq 0.05$  en la prueba de comparación múltiple de Tukey.

<sup>§</sup> Abreviaturas: CAA, capacidad de absorción de agua; CRA, capacidad de retención de agua; CH, capacidad de hinchamiento; CAG, capacidad de absorción de grasa.

En resumen, el mejor tratamiento es cuando todos los factores de estudio se encuentran en su nivel alto. Mediante las comparaciones múltiples de medias, prueba de Tukey, con un nivel de significación de 5% (Anexo 2.2); se confirma dicho análisis. Resultando el tratamiento 8 con mayor capacidad de absorción de agua, 7.32 g de agua/g fibra, siendo los parámetros de las variables 90 °C, 15 minutos y 1:2 de relación de materia prima: agua (p/v), tal como se muestra en el Tabla 7.

En la Figura 6, se puede observar que la capacidad de absorción de agua encontrado en este estudio fueron menores que los valores encontrados por Vilcanqui, (2009) en fibras obtenidas de las hojas de *Agave tequilana* Weber con proceso hidrotérmico y presión de vapor de agua; pero superior al obtenido con tratamiento ácido. Al respecto, no se han encontrado estudios sobre la influencia de la especie vegetal sobre la capacidad de absorción de agua, en particular en el género *Agave*; sin embargo en algas españolas y frutas, la cantidad de fibra y capacidad de absorción de agua es afectada por la variedad y el grado de maduración, que a su vez dependen de la estructura química de los polisacáridos constituyentes (Rojas, 1994; Sánchez, 2005; Rupérez *et al.*, 2001).





A: Fruto de níspero, B: Cáscara de mango Obo, C: Hoja de *Agave tequilana* con tratamiento hidrotérmico, D: Hoja de *Agave tequilana* tratado con presión de vapor de H<sub>2</sub>O, E: Hoja de *Agave tequilana* tratada con HCl, M1: Hoja de *Agave americana* tratada con proceso hidrotérmico.

Fuente: Elaborada con datos de la Tabla 1.

Figura 6. Capacidad de absorción de agua de fibra de *Agave americana* comparado con otros productos

#### 4.2.1.2. Capacidad de retención de agua

La capacidad de retención de agua (CRA) es una propiedad importante de fibra dietética, tanto desde el punto de vista fisiológico y tecnológico debido a la capacidad de la fibra para retener el agua dentro de su matriz (Al-Sheraji *et al.*, 2011). En la Tabla 7 se muestran los valores de la capacidad de retención de agua de las fibras del maguey obtenidas con diferentes parámetros del proceso hidrotérmico, donde se observan variaciones desde 8.50 hasta 9.81 g de agua/g de fibra.

Los parámetros de estudio como la temperatura de agua (T), tiempo de inmersión (t), relación materia prima: agua (R) y las interacciones influyen significativamente sobre la capacidad de retención de agua, excepto la interacción

Txt (Anexo 3.3). A pesar de ello, el gráfico de interacción del Anexo 3.5 indica que aumentando la temperatura a 90 °C y el tiempo a 15 minutos, complementado con 1:2 de relación de materia prima: agua (nivel alto) se logra incrementar la capacidad de retención de agua.

Respecto a la gráfica de interacción TxR, se puede apreciar que si la temperatura aumenta de 80 a 90 °C, cuando la relación materia prima: agua es 1:1, la capacidad de retención de agua incrementa favorablemente; pero si la relación materia prima: agua aumenta a 1:2 (p/v), la capacidad de retención de agua muestra una ligera disminución. Así, según lo comentado anteriormente, existe dos mejores combinaciones de parámetros asumiendo el efecto del factor relación materia prima: agua; el primero 90 °C, 15 minutos y 1:1 de relación materia prima: agua con un valor de 9.46 g de agua/g de fibra que corresponde al tratamiento 4; el segundo 90 °C, 15 minutos y 1:2 (p/v) de relación materia prima: agua con un valor de 9.65 g de agua/g de fibra que pertenece al tratamiento 8 tal como se indica en la Tabla 7. Sin embargo, el análisis comparativo de medias de Tukey del Anexo 3.2, indica que los tratamientos 4 y 8 son iguales estadísticamente ( $P > 0.05$ ), por lo que el tratamiento 8 es seleccionado como el mejor, teniendo en cuenta la compatibilidad de este tratamiento para obtener la capacidad de absorción con más alto valor.

Capitani *et al.*, (2012) indican que los tratamientos de calor pueden afectar a las propiedades de fibra dietética en diversos alimentos. De los análisis realizados se puede inferir que el efecto de la temperatura depende relativamente del nivel de relación de materia prima: agua. Esto se explicaría porque el agua en mayor

proporción y combinación con temperatura elevada (nivel alto) provocaría la disgregación de las paredes celulares de la fibra de maguey, favoreciendo la liberación y aumento de lignina de 2.29, 2.67 a 5.87 y 3.55% tal como ocurre en los tratamientos 3, 4, 7 y 8, respectivamente (Tabla 8), y paralelamente dejando libre la hemicelulosa, siendo este componente caracterizado por presentar mayor número de zonas amorfas y la presencia de moléculas de bajo peso molecular que son solubles en agua, (Badui, 2006), por consiguiente mayor capacidad de absorber las moléculas del agua (Rojas, 1994; BeMiller y Whistler, 2000). En otro estudio, Fuentes-Alventosa *et al.*, (2009) demostraron que la fibra obtenida del subproducto de espárrago con tratamiento térmico en agua a 60 °C durante 90 minutos con diferentes procesos de secado aumenta la capacidad de retención de agua en comparación al tratamiento térmico en agua a temperatura ambiente, este hecho se atribuye a la modificación estructural de la fracción insoluble de la fibra por efecto de la temperatura. A parte de la composición química otros factores que podrían haber influido en la capacidad de retención de agua son las características físicas y microestructuras de la fibra (Escalada Pla *et al.*, 2007).

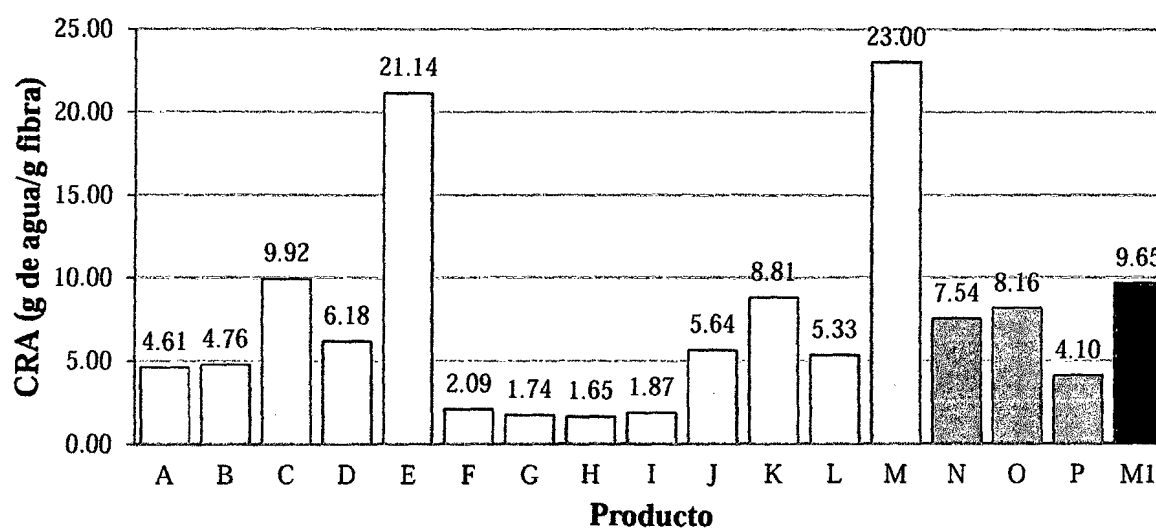
La capacidad de retención de agua obtenida para las fibras de las hojas de maguey fue mayor que la reportada para otras fuentes de fibra, pero menores a la de la pulpa de calabaza y raíz de *Polygonatum odoratum* tratado con vapor a 100 °C tal como se observa en la Figura 7. También se puede observar que el valor de capacidad de retención de agua del presente estudio superó a los valores reportados en las fibras de las hojas de *Agave tequilana* Weber obtenidas con proceso hidrotérmico, presión de vapor de agua y tratamiento ácido, a pesar que ambas hojas pertenecen al mismo género. La marcada diferencia se atribuye a la variación

relativa de los componentes de la pared celular de una especie vegetal a otra (Haard y Chism, 2000), lo cual es confirmado con los valores de 30.34% de celulosa, 11.24% de hemicelulosa y 3.40% de lignina obtenidos en proceso hidrotérmico a similares condiciones por Vilcanqui, (2009) comparado con los valores del presente estudio son mayores 46.62%, 21.03% y 3.55%, respectivamente (Tabla 8). Otro factor relacionado podría ser la fracción de fibra soluble, aunque en el presente estudio no se determinó, Borchani *et al.*, (2011) encontraron que el secado por liofilización en frutos de alligh, deglet nour y kentichi presentó valores más altos de capacidad de retención de agua y mayor contenido de fibra dietética soluble.

Leterme *et al.*, (1998) señala que una alta capacidad de retención de agua oscila entre 10 y 12 g de agua/g de fibra, en la fibra del maguey obtenida con proceso hidrotérmico se observa un valor cercano al intervalo señalado por lo que se puede decir que la capacidad de retención de agua es alta.

El valor de la capacidad de retención de agua determina el grado en que una fibra se puede incorporar a un sistema alimenticio para no deteriorar la viscosidad ni la apariencia del producto final; como la capacidad de retención de agua en el material estudiado es alta su aplicación se vería limitada en productos secos (galletas y cereales para desayuno), no así en productos que requieran de una apariencia de humedad como los rellenos de pasteles (Sánchez, 2005). Además, esta propiedad se relaciona con el efecto de frescura y suavidad que se presenta en los productos de panificación (Priego, 2007).





A: Salvado de trigo, B: Cáscara de cacao, C: Paja de arroz tratado con  $H_2O_2$ , D: Cáscara de *Diospyros kaki*, E: Raíz de *Polygonatum odoratum* tratado con vapor a 100 °C, F: Bagazo de pomelo, G: Bagazo de limón, H: Bagazo de naranja, I: Concentrado de manzana, J: Hongo Siitake, K: Fruto de mango, L: Bagazo de coco, M: Pulpa de calabaza, N: Hoja de *Agave tequilana* con tratamiento hidrotérmico, O: Hoja de *Agave tequilana* tratado con presión de vapor de  $H_2O$ , P: Hoja de *Agave tequilana* tratada con HCl, MI: Hoja de *Agave americana* tratada con proceso hidrotérmico.

Fuente: Elaborada con datos de la Tabla 1.

Figura 7. Capacidad de retención de agua de fibra de *Agave americana* comparado con otros productos

El valor de la capacidad de retención de agua determina el grado en que una fibra se puede incorporar a un sistema alimenticio para no deteriorar la viscosidad ni la apariencia del producto final; como la capacidad de retención de agua en el material estudiado es alta su aplicación se vería limitada en productos secos (galletas y cereales para desayuno), no así en productos que requieran de una apariencia de humedad como los rellenos de pasteles (Sánchez, 2005). Además, esta propiedad se relaciona con el efecto de frescura y suavidad que se presenta en los productos de panificación (Priego, 2007).

#### 4.2.1.3. Capacidad de hinchamiento

La posibilidad de aumentar en grandes cantidades después de la absorción de agua es una de las propiedades funcionales importantes de las fibras (Lan *et al.*, 2012). En la Tabla 7 se muestran los valores de capacidad de hinchamiento (CH) que varían en un rango de 7.24 a 10.47 mL/g de fibra, siendo los tratamientos 6 y 8 los que presentan mayores valores.

Los parámetros de estudio del proceso hidrotérmico tales como la temperatura de agua (T), tiempo de inmersión (t) y relación de materia prima: agua (R), así como las interacciones presentaron efecto significativo ( $P < 0.05$ ) en la capacidad de hinchamiento de la fibra. De acuerdo a la gráfica de interacción Txt del Anexo 4.5, cuando la temperatura se incrementa de 80 a 90 °C, durante 10 minutos, la capacidad de hinchamiento incrementa; pero si el tiempo se prolonga a 15 minutos, la capacidad de hinchamiento aumenta en menor proporción, lo que revela una ligera influencia del factor tiempo de inmersión sobre la capacidad de hinchamiento.

En cuanto a la gráfica de interacción TxR del Anexo 4.5, puede observarse que a medida va aumentando la temperatura de agua y la relación de materia prima: agua, incrementa marcadamente la capacidad de hinchamiento. Asimismo la interacción txR, indica que la relación de materia prima: agua cuando se encuentra en su nivel alto (1:2 p/v) favorece el aumento de la capacidad de hinchamiento sin importar la variación del tiempo, pero se produce un efecto negativo cuando la relación de materia prima: agua disminuye a 1:1 p/v. Una posible explicación de este hecho se debe a que menores proporciones de agua limitan en el debilitamiento

de la estructura cristalina y amorfa de la fibra, por tanto no mejoran la capacidad de hinchamiento.

Conforme a los análisis realizados, teniendo en cuenta el efecto significativo del factor tiempo, existen dos mejores combinaciones de parámetros que mejoran la capacidad de hinchamiento, el primero corresponde al tratamiento 6 (90 °C, 10 minutos y 1:2 p/v) y segundo al tratamiento 8 (90 °C, 15 minutos y 1:2 p/v). El análisis estadístico de comparaciones múltiples de Tukey (Anexo 4.2) indica que ambos tratamientos son diferentes estadísticamente, siendo el tratamiento 6 quien presenta mayor valor de capacidad de hinchamiento. Sin embargo, en función del contenido de fibra detergente neutro ambos resultaron ser iguales. Entonces, se seleccionó al tratamiento 8 como el mejor, a pesar que presentó el segundo menor valor de capacidad de hinchamiento; pero justificando que fue el tratamiento que también mejoró la capacidad de absorción y retención de agua.

López *et al.*, (1996) observaron que a mayor cantidad de fibra insoluble, es mayor la capacidad de hinchamiento. En la Tabla 8, los tratamientos 6 y 8 reportan 50.10 y 46.62% de celulosa, así como 15.36 y 21.03% de hemicelulosa, respectivamente, siendo valores superiores a otros tratamientos con menor capacidad de hinchamiento, lo que confirmaría la relación directa entre la mayor cantidad de fibra insoluble, principalmente de celulosa y hemicelulosa y el incremento del valor de la capacidad de hinchamiento, posiblemente debido a que los bultos cristalinos tridimensionales estabilizados por numerosos hidrógenos intermoleculares adheridos y fuerzas de Van der Waals en la celulosa, fueron modificados y liberados en el proceso hidrotérmico (Izydorczyk *et al.*, 2005). Otro

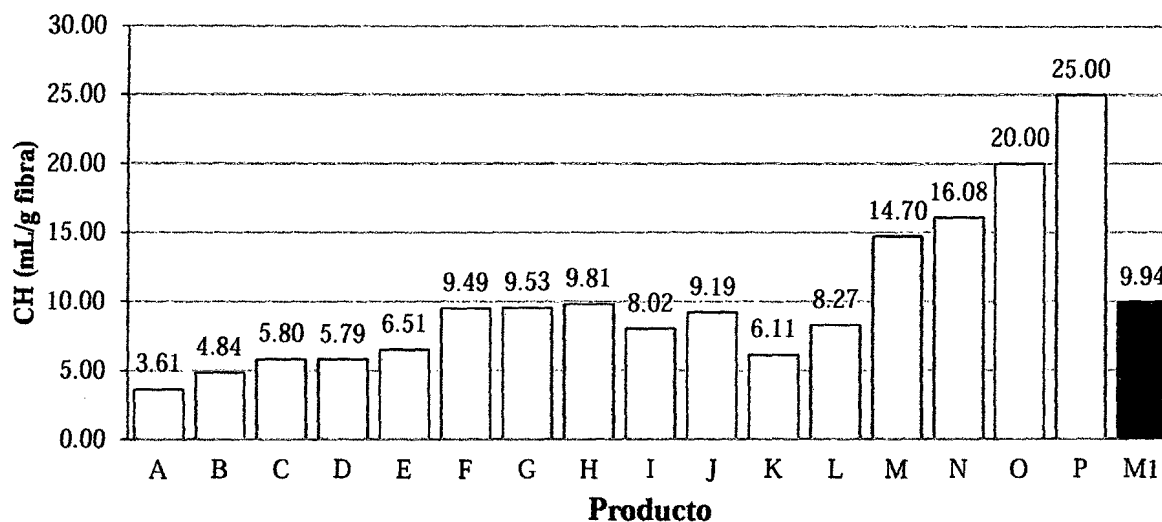
posible mecanismo que ocurre en el hinchamiento, según López *et al.*, (1996) es cuando el agua queda retenida en las estructuras capilares dentro de la fibra por su alta tensión superficial y, además mediante la interacción con diversos componentes moleculares de la fibra a través de la formación de enlaces de hidrógeno (Al-Sheraji *et al.*, 2011).

Los efectos fisiológicos de la capacidad de hinchamiento de la fibra en beneficio de la salud del hombre está relacionado con el aumento del volumen de la materia fecal, que provoca un incremento en los movimientos peristálticos del intestino para facilitar el tránsito acelerado de los constituyentes del alimento en el intestino y aquellas sustancias irritantes, cancerígenas y tóxicas, que generalmente requieren más tiempo para entrar en el sistema linfático, por consiguiente no tienen oportunidad de hacerlo y se eliminan por las heces (Badui, 2006).

La capacidad de hinchamiento de las fibras en otras especies del género *Agave*, así como aquellas obtenidas mediante proceso hidrotérmico a similares condiciones no se reportaron en otros estudios, sin embargo en la Figura 8 se puede observar la comparación con otras fuentes de fibras. La fibra de las hojas del maguey presenta valores más altos que la fibra de níspero, bagazo de carambola, cáscara de mango, salvado de trigo, cáscara de cacao, bagazo de pomelo, bagazo de limón, bagazo de naranja y concentrado de manzana; pero menores que la fibra de hongo Shiitake, fruto de mango, bagazo de coco y pulpa de calabaza; y valores similares a los concentrados de la fibra de paja de arroz tratado con peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), cáscara de *Diospyros kaki* y la raíz de *Polygonatum odoratum* tratado con vapor a 100 °C; dando entender que la fibra de maguey puede tener



considerable impacto en su uso como ingrediente en los alimentos para la nutrición humana.



A: Fruto de níspero, B: Bagazo de carambola, C: Cáscara de mango, D: Salvado de trigo, E: Cáscara de cacao, F: Paja de arroz tratado con  $H_2O_2$ , G: Cáscara de *Diospyros kaki*, H: Raíz de *Polygonatum odoratum* tratado con vapor a 100 °C, I: Bagazo de pomelo, J: Bagazo de limón, K: Bagazo de naranja, L: Concentrado de manzana, M: Hongo Siitake, N: Fruto de mango, O: Bagazo de coco, P: Pulpa de calabaza, M1: Hoja de *Agave americana* tratada con proceso hidrotérmico.

Fuente: Elaborada con datos de la Tabla 1.

Figura 8. Capacidad de hinchamiento de fibra de *Agave americana* comparado con otros productos

Diversos factores ligados a la especie, el tipo procesamiento o la composición de los polisacáridos de la pared celular vegetal podrían ser responsables de las diferencias en la capacidad de hinchamiento de las fibras. Zhang *et al.*, (2011) señalan que la capacidad de hinchamiento está significativamente influenciada por la extrusión, de forma que el salvado de avena extruida mostró aumento en el valor de la capacidad de hinchamiento, debido al mayor peso molecular, el contenido de fibra soluble, la formación de capilares y estructura porosa. Por otra parte, Benítez,

(2011) observaron en las fibras de subproductos de cebolla que la esterilización tiene una influencia significativa en el descenso del valor de la capacidad de hinchamiento; mientras Borchani *et al.*, (2011) estudiaron el efecto del secado por liofilizado, secado al sol y horno en las fibras de los frutos de alligh, deglet nour y kentichi, encontrando valores más altos de capacidad de hinchamiento en fibras liofilizadas debido al mayor contenido de fibra dietética soluble. Además, Akter *et al.*, (2010) encontraron que la capacidad de hinchamiento en la fibra de la cáscara de *Diospyros kaki* lavadas con agua a 90 °C durante 2 minutos fueron mayores que las fibras sin lavar, posiblemente por la alteración de los tejidos estructurales durante el tratamiento de lavado. En otro estudio Zhu *et al.*, (2010) demostraron que la molienda ultrafina del salvado de trigo (10-620 nm de diámetro) causaron disminución de la capacidad de hinchamiento y capacidad de retención de agua, así como del contenido de fibra dietética relacionándose esta variación con la alteración de la estructura matriz de la fibra, al respecto Raghavendra *et al.*, (2006) en la fibra obtenida del residuo de coco, demostraron que la reducción del tamaño de partícula hasta 0.55 mm aumentó la capacidad de retención del agua y la capacidad de hinchamiento, mayores reducciones de tamaño disminuyeron dichas propiedades.

#### 4.2.1.4. Capacidad de absorción de grasa

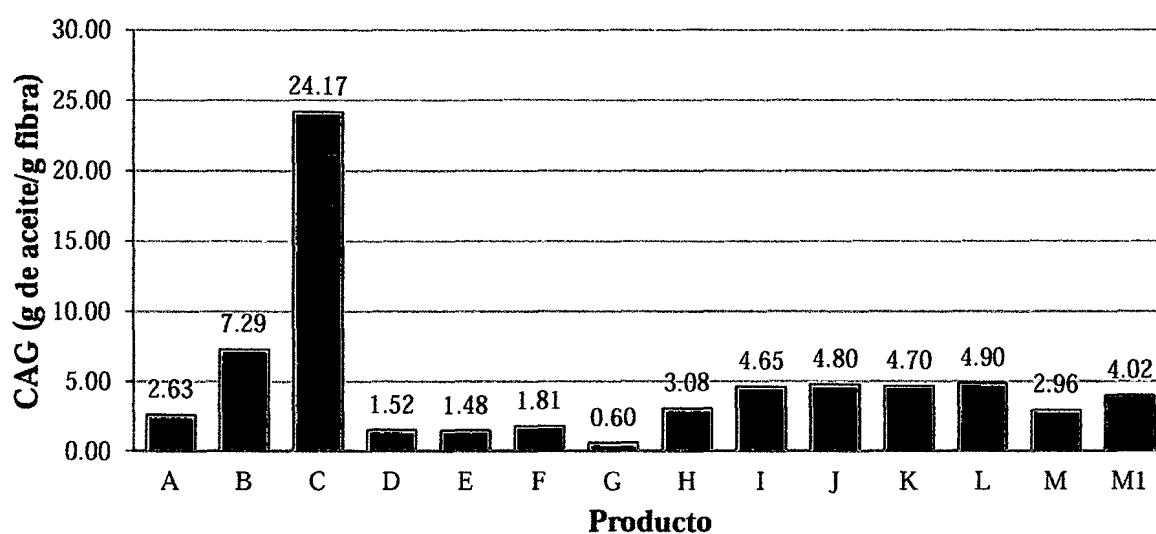
Muchos de los investigadores, también conocen a esta propiedad física como la capacidad de absorción de moléculas orgánicas o capacidad de retención de aceite, siendo importante su determinación para aplicaciones en la industria alimentaria y la alimentación (Lan *et al.*, 2012). Los valores encontrados de capacidad de

absorción de grasa (CAG) con los diferentes parámetros del proceso hidrotérmico se muestran en la Tabla 7 con una variación de 3.15 a 4.02 de aceite absorbida/g de fibra. El análisis de varianza multifactorial del Anexo 5.3, indica que la temperatura de agua (T), tiempo de inmersión (t) y la relación materia prima: agua (R) influyen significativamente ( $P < 0.05$ ) sobre la capacidad de absorción de grasa, excepto la interacción TtxR.

El gráfico de interacciones del Anexo 5.5, señala que la temperatura de agua (T), el tiempo de inmersión (t) y relación de materia prima: agua (R) en sus niveles bajos disminuyen el valor de la capacidad de absorción de grasa, sin embargo cuando se encuentran en sus niveles altos incrementan la capacidad de absorción de grasa; siendo la temperatura de agua y la relación de materia prima: agua el que presenta mayor efecto. Estos resultados ponen de manifiesto que el tratamiento 8 es el mejor, siendo sus parámetros 90 °C, 15 minutos y 1:2 de relación de materia prima: agua.

Lan *et al.*, (2012) observaron que a mayores cantidades de fibra insoluble, la capacidad de absorber y retener aceite incrementa; este comportamiento se observó claramente al realizar la comparación múltiple de Tukey en todos los tratamientos, donde el tratamiento 8 reporta mayor valor de capacidad de absorción de grasa (Anexo 5.2) y contenido elevado de fibra detergente neutro (Anexo 6.2), siendo el componente mayoritario respecto a los demás tratamientos la hemicelulosa con 21.03% (Tabla 8), lo que posiblemente hace que tenga mayor influencia en la mejora de la capacidad de absorción de grasa.

En la Figura 9 se tiene la comparación de la capacidad de absorción de grasa con otras fuentes de fibra, donde el valor del producto en estudio supera a las fibras del concentrado de manzana, bagazo de carambola, pomelo, limón y naranja; pero es inferior a las fibras de la paja de arroz tratado con peróxido de hidrógeno, Raíz de *Polygonatum odoratum* tratado con vapor a 100 °C, fruto de mango y bagazo de coco. En comparación con las fibras de *Agave tequilana* Weber obtenidas con proceso hidrotérmico, presión de vapor de agua e hidrolisis ácida también resultan ligeramente inferiores, esta variación puede ser atribuida a la especie vegetal, componentes de la pared celular y la naturaleza del procesamiento (Rojas, 1994).



A: Bagazo de carambola, B: Paja de arroz tratado con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, C: Raíz de *Polygonatum odoratum* tratado con vapor a 100 °C, D: Bagazo de pomelo, E: Bagazo de limón, F: Bagazo de naranja, G: Concentrado de manzana, H: Hongo Shiitake, I: Fruto de mango, J: Bagazo de coco, K: Hoja de *Agave tequilana* con proceso hidrotérmico, L: Hoja de *Agave tequilana* tratado con presión de vapor de H<sub>2</sub>O, M: Hoja de *Agave tequilana* tratada con HCl, M1: Hoja de *Agave americana* tratada con proceso hidrotérmico.

Fuente: Elaborada con datos de la Tabla 1.

Figura 9. Capacidad de absorción de grasa de fibra de *Agave americana* comparado con otros productos

Debido a la capacidad de absorción de grasa superior que la mayoría de las fuentes de fibra, en la industria alimentaria su aplicación puede ser importante en la prevención de las pérdidas de grasa en la cocción y en la alimentación en la absorción de ácidos biliares aumentando su excreción por las heces, asociándose con la reducción del colesterol en el plasma (Lan *et al.*, 2012). Priego, (2007) señala que en los productos fritos cuando es baja la capacidad de absorción de grasa proporciona una sensación no grasosa, cuando es alta, imparte a los productos cárnicos jugosidad y mejor textura; y en algunos productos es útil en la promoción de la emulsificación (Al-Sheraji *et al.*, 2011).

#### 4.2.2. Determinación de fibra por métodos detergentes

En la Tabla 8 se muestra el contenido de fibra detergente neutro (FDN) que provienen de la combinación de tres parámetros de estudio. En dicha tabla se puede observar un rango de variación de 49.41 hasta 71.21%, presentando el valor más alto el tratamiento 8.

El análisis de varianza del Anexo 6.3, indica que la temperatura de agua (T), tiempo de inmersión (t), interacción txR y TtxtR influyen significativamente sobre el contenido de fibra detergente neutro ( $P < 0.05$ ), a excepción de la relación materia prima: agua (R), interacción temperatura de agua-tiempo y temperatura de agua-relación materia prima: agua. En el gráfico de interacción de factores del Anexo 6.5, se aprecia que la temperatura de agua, el tiempo de inmersión y la relación de materia prima: agua en sus niveles altos, incrementan el valor de fibra detergente neutro, dichas características de los parámetros corresponde al tratamiento 8; aunque se observa una ligera disminución, cuando el tiempo de

inmersión es prolongado a 15 minutos complementado con la relación de materia prima: agua de 1:2, pero que estadísticamente son iguales.

De acuerdo a la comparación de medias de Tukey del Anexo 6.2 el tratamiento 4, 6 y 8 producen mayor contenido de fibra detergente neutro y son iguales estadísticamente (Anexo 6.2), donde el factor con efecto altamente significativo es la temperatura del agua; lo que permite concluir que a medida que aumenta la temperatura del agua (nivel alto), se incrementa el porcentaje de fibra detergente neutro, incidiendo en el aumento de celulosa y hemicelulosa. Lo anterior, concuerda con lo señalado por Rojas, (1994), quien comprobó el incremento del contenido de fibra detergente neutro en 19 vegetales mediante la cocción respecto a los vegetales crudos, mientras con el proceso de la fritura ocurrió una disminución drástica. Asimismo, Vasishtha y Srivastava, (2013) reportaron aumento de fibra insoluble en semillas de garbanzos durante la cocción, atribuyendo el aumento de la celulosa a las pérdidas de azúcares solubles, la reducción de los fitatos y minerales, y la actividad de la amilasa durante el remojo y antes de la cocción. Mientras Zia-ur-Rehman y Shah, (2004) en garbanzo, lenteja y haba coccionada con procedimiento ordinario reportaron disminución significativa del contenido de fibra detergente neutro, aún con mayor efecto en la cocción a presión, dicha diferencia relaciona con la degradación parcial de la celulosa y la hemicelulosa en carbohidratos simples. En otro estudio para obtención de fibra de las hojas de col (*Brassica oleracea* L. var. capitata), el escaldado con vapor por un minuto y con agua a 95 °C durante 2 minutos no mostraron influencia significativa en el contenido de fibra dietética (Tanongkankit *et al.*, 2012).

Los análisis realizados en función del incremento del contenido de fibra detergente neutro y valores altos de propiedades funcionales permiten seleccionar al tratamiento 8 como el mejor, con un valor de 71.21% de fibra detergente neutro, siendo sus parámetros de las variables 90 °C, 15 minutos y 1:2 de relación materia: agua p/v, tal como se indica en la Tabla 8.

El contenido de fibra detergente neutro que presentó el maguey fue mayor al reportado en cáscara de plátano (26.10%), subproductos de cítricos (39.6 - 59.84%), fibras de *Agave tequilana* Weber obtenida con proceso hidrotérmico (39.71%), con presión de vapor de agua (46.74%) y con hidrólisis ácida (65.14%), especie vegetal que pertenece al mismo género que el material en estudio (Happi Emaga *et al.*, 2008; Marín *et al.*, 2007; Vilcanqui, 2009); pero menor al reportado en paja de arroz tratado con peróxido de hidrógeno (83.78%) (Sangnark y Noomhorm, 2004).

Se observó una correlación entre los parámetros de obtención del proceso hidrotérmico y las propiedades funcionales, así como el contenido de fibra detergente neutro, es decir, con los mismos parámetros del proceso hidrotérmico no sólo se puede aumentar el contenido de fibra detergente neutro sino mejorar las propiedades funcionales.

Tabla 8. Componentes de fibra detergente neutro obtenidos con proceso hidrotérmico

Trata- miento	Parámetros de estudio			Fibra detergente neutro (%) <sup>ψ</sup>	Celulosa (%) <sup>ξ</sup>	Hemicelulosa (%) <sup>λ</sup>	Lignina (%) <sup>φ</sup>
	T (°C)	t (minuto)	R (g-mL)				
Control				57.99 ± 0.71	53.50	3.22	1.27
1	80	10	1:1	49.41 ± 0.35 <sup>e</sup>	45.00	0.77	3.64
2	90	10	1:1	66.30 ± 1.01 <sup>b</sup>	45.69	16.49	4.13
3	80	15	1:1	58.65 ± 1.55 <sup>c</sup>	49.15	7.21	2.29
4	90	15	1:1	70.78 ± 0.21 <sup>a</sup>	49.64	18.46	2.67
5	80	10	1:2	52.93 ± 0.27 <sup>de</sup>	45.52	3.01	4.40
6	90	10	1:2	67.83 ± 0.31 <sup>ab</sup>	50.10	15.36	2.38
7	80	15	1:2	54.58 ± 1.42 <sup>cd</sup>	47.94	0.76	5.87
8	90	15	1:2	71.21 ± 3.72 <sup>a</sup>	46.62	21.03	3.55

<sup>ψ</sup> Valores de media ± desviación estándar de 3 repeticiones. Los datos con letras diferentes en la columna indican diferencias significativas estadísticamente entre los ocho tratamientos a un nivel de  $P \leq 0.05$  en la prueba de comparación múltiple de Tukey.

<sup>ξ</sup> Celulosa = FDA - LDA

<sup>λ</sup> Hemicelulosa = FDN - FDA

<sup>φ</sup> Lignina = LDA

### 4.3. OBTENCIÓN DE FIBRA MEDIANTE EXPANSIÓN POR EXPLOSIÓN

#### 4.3.1. Determinación de propiedades funcionales por métodos físicos

##### 4.3.1.1. Capacidad de absorción de agua

La capacidad de absorción de agua (CAA) es la cantidad de agua que una fuente de fibra es capaz de absorber cuando se coloca en una cantidad suficiente de la misma.

En la Tabla 9 se observa los resultados de la capacidad de absorción de agua procedente de los diferentes parámetros estudio, cuyos valores varían desde 5.58 hasta 6.74 g de agua/g de fibra.



Para medir el efecto de cada uno de los factores en estudio, los resultados se analizaron estadísticamente mediante el ANOVA multifactorial (Anexo 7.3), donde la presión en el expansor (P), peso (p) y humedad de fibra (H), al igual que las interacciones Pxp, PxH y PxpH, tienen influencia significativa ( $P < 0.05$ ) sobre la capacidad de absorción de agua; sin embargo, la interacción pxH no presentó influencia significativa. En el gráfico de interacción de factores del Anexo 7.5 se observa el incremento de la capacidad de absorción de agua cuando la presión en el expansor está en su nivel bajo ( $110 \text{ lbf/plg}^2$ ) en combinación con el peso y la humedad de la fibra en su nivel alto (110 g y 62%, respectivamente), éstos parámetros corresponden al tratamiento 7; también se puede mejorar la capacidad de absorción de agua incrementando la presión y la humedad pero disminuyendo el peso, parámetros del tratamiento 6. En ambos tratamientos existe una alta y leve influencia de la presión y peso de fibra, respectivamente. Efectuando la comparación múltiple de medias del Anexo 7.2, se identificó que ambos tratamientos son diferentes estadísticamente, resultando el tratamiento 7 con la capacidad de absorción de agua más alto (6.74 g de agua/g de fibra). Al encontrar el único tratamiento en su grupo, se eligió como el mejor, cuyos parámetros de las variables son de  $110 \text{ lbf/plg}^2$  de presión, con 110g de peso y 62% de humedad de fibra.

Tabla 9. Valores de las propiedades funcionales de la fibra de hojas del maguey obtenidas con expansión por explosión

Tratamiento	Parámetros de estudio			Propiedades funcionales <sup>§</sup>			
	Presión en expansor (lbf/pulg <sup>2</sup> )	Peso de fibra (g)	Humedad de fibra (%)	CAA (g/g)	CRA (g/g)	CH (mL/g)	CAG (g/g)
Control				6.73 ± 0.03	7.64 ± 0.06	6.73 ± 0.00	3.67 ± 0.02
1	110	90	53	6.15 ± 0.03 <sup>e</sup>	7.00 ± 0.08 <sup>e</sup>	5.74 ± 0.00 <sup>e</sup>	4.04 ± 0.03 <sup>a</sup>
2	130	90	53	6.37 ± 0.05 <sup>c</sup>	7.47 ± 0.04 <sup>c</sup>	6.47 ± 0.01 <sup>b</sup>	3.71 ± 0.07 <sup>c</sup>
3	110	110	53	5.91 ± 0.02 <sup>f</sup>	7.24 ± 0.05 <sup>d</sup>	5.98 ± 0.00 <sup>d</sup>	3.87 ± 0.02 <sup>b</sup>
4	130	110	53	6.27 ± 0.04 <sup>d</sup>	7.32 ± 0.03 <sup>d</sup>	5.95 ± 0.06 <sup>d</sup>	3.49 ± 0.01 <sup>d</sup>
5	110	90	62	6.12 ± 0.00 <sup>e</sup>	7.69 ± 0.01 <sup>ab</sup>	6.24 ± 0.01 <sup>c</sup>	3.80 ± 0.08 <sup>bc</sup>
6	130	90	62	6.51 ± 0.02 <sup>b</sup>	7.57 ± 0.03 <sup>bc</sup>	6.48 ± 0.01 <sup>b</sup>	4.05 ± 0.04 <sup>a</sup>
7	110	110	62	6.74 ± 0.05 <sup>a</sup>	7.74 ± 0.02 <sup>a</sup>	6.73 ± 0.01 <sup>a</sup>	4.16 ± 0.02 <sup>a</sup>
8	130	110	62	5.58 ± 0.06 <sup>g</sup>	7.05 ± 0.03 <sup>e</sup>	6.73 ± 0.01 <sup>a</sup>	3.89 ± 0.08 <sup>b</sup>

<sup>a, b, c, d, e, f, g</sup> Datos expresados como media ± desviación estándar (n=3). Valores en la misma columna con letras diferentes indican diferencias significativas estadísticamente entre los ocho tratamientos a un nivel de  $P \leq 0.05$  en la prueba de comparación múltiple de Tukey.

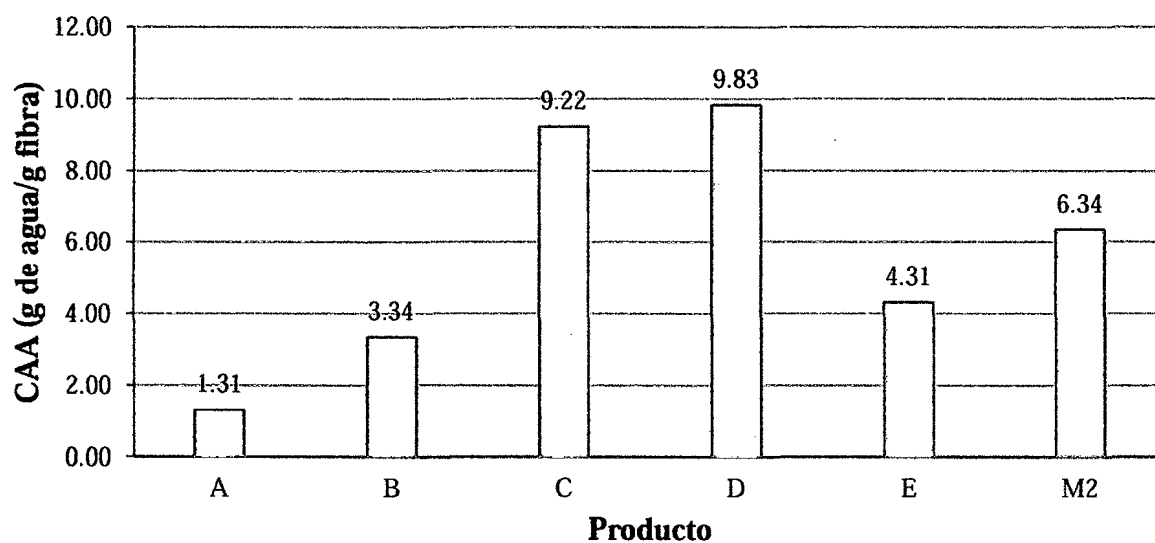
<sup>§</sup> Abreviaturas: CAA, capacidad de absorción de agua; CRA, capacidad de retención de agua; CH, capacidad de hinchamiento; CAG, capacidad de absorción de grasa.



El análisis anterior permite deducir que el factor más influyente es la presión en el expansor y para mejorar el valor de capacidad de absorción de agua es recomendable mantener en su nivel bajo, aumentando el peso y humedad de la fibra. En esta propiedad se incluye al agua fuertemente ligada y aquella que puede eliminarse debido a que su unión no es lo suficientemente fuerte para permanecer enlazada; sobre esta propiedad tiene influencia la composición de la pared celular y la presencia de grupos funcionales libres con capacidad de enlazar agua, ya sea por interacciones físicas o químicas; de manera que el origen de la fuente y las cantidades presentes de fibra insoluble y soluble delimitan el comportamiento (Zambrano *et al.*, 1998, citado por Sánchez, 2005).

En la Figura 10, se observa que la capacidad de absorción de agua del producto en estudio fue menor que las fibras de las hojas de *Agave tequilana* Weber obtenida con proceso hidrotérmico y presión de vapor de agua; pero mayor que la fibra obtenida con hidrólisis ácida (Vilcanqui, 2009), cáscara de mango Obo y frutos de níspero (Sánchez, 2005). Esta diferencia probablemente sea debido a que estas fuentes de fibra tienen origen vegetal y procesamiento diferente.





A: Fruto de níspero, B: Cáscara de mango Obo, C: Hoja de *Agave tequilana* con tratamiento hidrotérmico, D: Hoja de *Agave tequilana* tratado con presión de vapor de H<sub>2</sub>O, E: Hoja de *Agave tequilana* tratada con HCl, M2: Hoja de *Agave americana* tratada con expansión por explosión.

Fuente: Elaborada con datos de la Tabla 1.

Figura 10. Capacidad de absorción de agua de fibra de *Agave americana* comparado con otros productos

#### 4.3.1.2. Capacidad de retención de agua

Los resultados de capacidad de retención de agua (CRA) de la fibra obtenida mediante expansión por explosión se muestran en la Tabla 9, se puede observar que el rango de variación es de 7 a 7.74 g de agua retenida/g de fibra. Mediante el análisis estadístico del Anexo 8.3 se observa que los tres parámetros de estudio y las interacciones influyen significativamente ( $P < 0.05$ ) sobre la capacidad de retención de agua.

En el gráfico de interacciones del Anexo 8.5 se aprecia el efecto positivo (incremento de la CRA) que ejerce el peso de la fibra en su nivel alto y bajo, siempre y cuando la presión en el expansor se encuentra en su nivel bajo combinado con la humedad en su nivel alto; estas características corresponden a los

parámetros del tratamiento 5 y 7. Al existir dos tratamientos con valores superiores de capacidad de retención de agua y la necesidad de seleccionar el mejor, se prosiguieron con la comparación de medias de Tukey (Anexo 8.2), resultando iguales estadísticamente ( $P > 0.05$ ). Entre el tratamiento 5 y 7 se observa que el peso de la fibra (90 y 110 g) es el único parámetro que varía, lo que sugiere elegir al que tiene mayor peso, pues llevando el proceso a mayor escala, el rendimiento aumentaría generando incremento de rentabilidad en términos económicos. Además considerando como criterio adicional el incremento de la capacidad de absorción de agua, se seleccionó el tratamiento 7 con los parámetros de 110 lbf/plg<sup>2</sup> de presión en el expansor, 110 g de fibra y 63% de humedad.

La influencia negativa de la elevada presión y baja humedad de fibra se atribuye a la remoción y disminución ligera del contenido de hemicelulosa y lignina (Tabla 10), que a su vez habría ocasionado la posible desintegración física de los componentes de la fibra con limitados enlaces de puentes de hidrógeno de la celulosa, ocasionando el descenso de la capacidad de retención de agua, ya que los enlaces de puentes de hidrógeno convierten a la fibra en un soluto hidrófilo capaz de interactuar entre las moléculas de agua (Fennema, 2000; BeMiller y Whistler, 2000).

La fibra del maguey obtenida con expansión por explosión presentó una baja capacidad de ligar agua, pues según Leterme *et al.*, (1998) una alta capacidad oscila entre 10 y 12 g de agua/g. El valor de la capacidad de retención de agua determina el grado en que una fibra se puede incorporar a un sistema alimenticio para no deteriorar la viscosidad ni la apariencia del producto final; como la

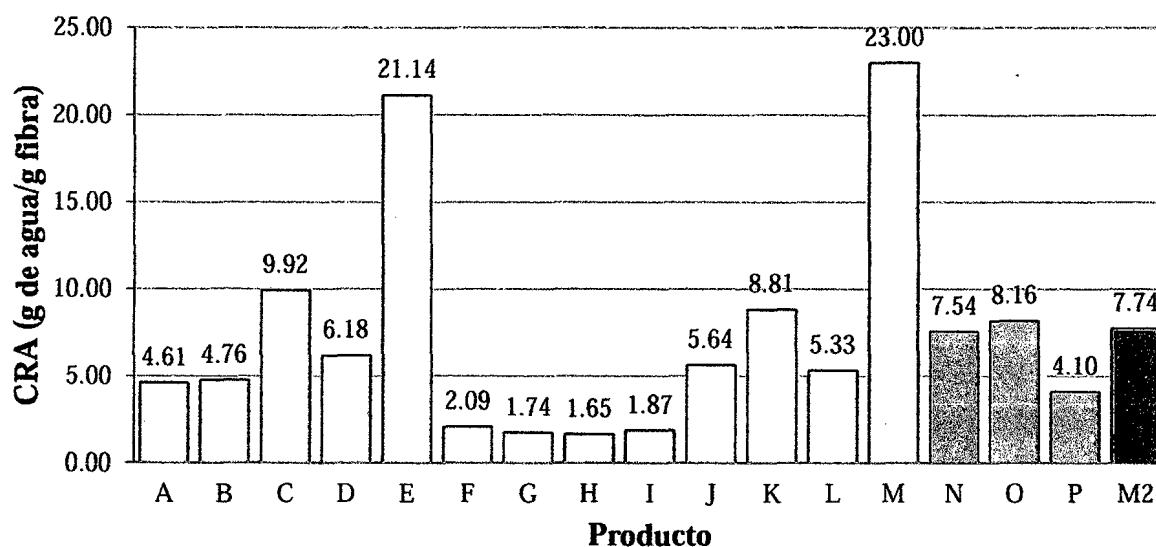


capacidad de retención de agua en el material estudiado es baja su aplicación se vería limitada en alimentos que requieran de una apariencia de humedad (reellenos de pasteles), no así en productos secos como las galletas y cereales para desayuno (Sánchez, 2005).

El valor de capacidad de retención de agua de las fibras del maguey obtenidas con expansión en comparación con otras fuentes de fibra vegetal se muestra en la Figura 11. Se observa que la capacidad de retención de agua del producto en estudio superó a los reportados en fibras de salvado de trigo, cáscara de cacao, cáscara de *Diospyros kaki*, Bagazo de pomelo, limón, naranja y coco, concentrado de manzana, hoja de *Agave tequilana* con tratamiento hidrotérmico e hidrólisis ácida. Sin embargo, fue menor que las fibras de la paja de arroz tratado con peróxido de hidrógeno, raíz de *Polygonatum odoratum* tratado con vapor a 100 °C, fruto de mango, pulpa de calabaza y la hoja de *Agave tequilana* tratada con presión de vapor de agua.

La extrusión es un proceso térmico que implica la aplicación de calor, alta presión, y las fuerzas de cizallamiento a una masa sin cocer, que causa cambios en la composición nutricional y en el producto final (Repo-carrasco *et al.*, 2009). Comparado con expansión por explosión presenta una ligera similitud teniendo en cuenta el cambio brusco que ejerce la caída de presión en la fibra. Zhang *et al.*, (2011) encontraron valores superiores de la capacidad de retención de solventes como el agua en salvado de avena extruido, respecto al salvado de avena sin extruir, atribuyendo la diferencia al mayor contenido de fibra soluble.





A: Salvado de trigo, B: Cáscara de cacao, C: Paja de arroz tratado con  $H_2O_2$ , D: Cáscara de *Diospyros kaki*, E: Raíz de *Polygonatum odoratum* tratado con vapor a  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , F: Bagazo de pomelo, G: Bagazo de limón, H: Bagazo de naranja, I: Concentrado de manzana, J: Hongo Siitake, K: Fruto de mango, L: Bagazo de coco, M: Pulpa de calabaza, N: Hoja de *Agave tequilana* con tratamiento hidrotérmico, O: Hoja de *Agave tequilana* tratado con presión de vapor de  $H_2O$ , P: Hoja de *Agave tequilana* tratada con HCl, M2: Hoja de *Agave americana* tratada con expansión por explosión.

Fuente: Elaborada con datos de la Tabla 1.

Figura 11. Capacidad de retención de agua de fibra de *Agave americana* comparado con otros productos

#### 4.3.1.3. Capacidad de hinchamiento

Los resultados de la capacidad de hinchamiento (CH) de la fibra obtenida con diversos parámetros de expansión por explosión se muestran en la Tabla 9, cuyos valores varían en un intervalo de 5.74 a 6.73 mL/g.

En el Anexo 9.3, se reporta los resultados del análisis de varianza multifactorial, donde se determina que existe influencia significativa de los tres factores de estudio, así como de la interacción doble y triple ( $P < 0.05$ ) sobre la capacidad de hinchamiento. El gráfico de interacción de factores del Anexo 9.5 señala que el incremento de capacidad de hinchamiento se produce cuando la

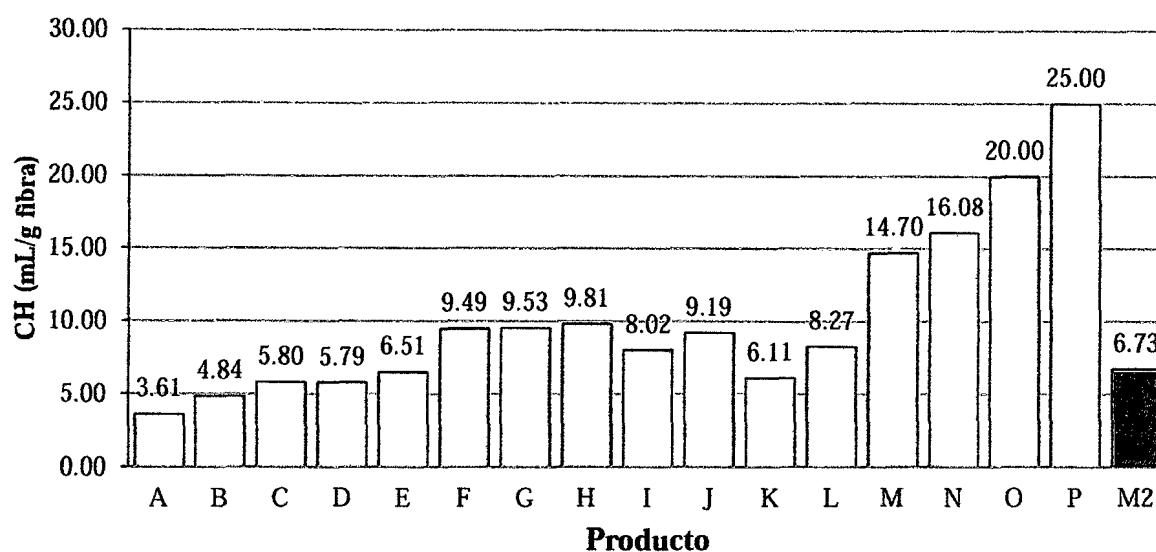
presión se encuentra en su nivel bajo y alto, en combinación con el peso y humedad de fibra en su nivel alto, estos parámetros corresponden al tratamiento 7 y 8. La comparación de medias de Tukey con un nivel de confianza del 95% del Anexo 9.2, reporta que son numérica y estadísticamente iguales. Al respecto se puede deducir que el aumento de presión en el expansor no ejerce mucha influencia en el valor de la capacidad de hinchamiento cuando la humedad es alta (63%); por tanto manteniendo en su nivel bajo la presión (110 lbf/plg<sup>2</sup>) se reduciría el costo de procesamiento, al ser menores los requerimientos de combustible, lo que implica la selección del tratamiento 7 como el mejor, cuyos parámetros son 110 lbf/plg<sup>2</sup> de presión en el expansor, 110 g de fibra y 63% de humedad.

Lan *et al.*, (2012) sugieren que las diferencias de los valores de la capacidad de hinchamiento están en función de la estructura física de la fibra, que puede ser manipulada por el método de procesamiento. En el presente estudio el incremento de capacidad de hinchamiento podría estar relacionado con la desintegración de los componentes de la pared celular por la variación de las presiones en el expansor y la humedad de la fibra, debido a que las fibras con humedad incrementada por efecto de la presión en el expansor promueven la disminución ligera del contenido de lignina y aumento de celulosa (Tabla 10), este último que se caracteriza por la capacidad de captar agua a través de los puentes de hidrógeno cuando son liberados de su estructura cristalina y amorfa (BeMiller y Whistler, 2000). En el salvado de avena extruida la mejora de la capacidad de hinchamiento se atribuye al incremento de fibra soluble, la formación de los capilares y estructura porosa (Zhang *et al.*, 2011), aunque la extrusión es un proceso diferente y mejorado que el método de

expansión por explosión, posiblemente ocurra algunos cambios semejantes por efectos de la presión.

La capacidad de hinchamiento de la fibra obtenida con expansión por explosión resultó ser más alto que la fibra del fruto de níspero, bagazo de carambola, cáscara de mango, salvado de trigo, cáscara de cacao, bagazo de naranja; pero menores que las fibras de paja de arroz tratado con peróxido de hidrógeno, cáscara de *Diospyros kaki*, raíz de *Polygonatum odoratum* tratado con vapor a 100 °C, bagazo de pomelo, bagazo de limón, concentrado de manzana, hongo Siitake, fruto de mango, bagazo de coco y pulpa de calabaza, tal como se observa la Figura 12. Esta variación se atribuye a los constituyentes naturales del material vegetal y el tipo de procesamiento al que fue sometido (BeMiller y Whistler, Rojas, 1994; Lan *et al.*, 2012).

La capacidad de hinchamiento está relacionado con el aumento del volumen de la materia fecal, que provoca un incremento en los movimientos peristálticos del intestino para facilitar el tránsito acelerado de los constituyentes del alimento en el intestino y aquellas sustancias irritantes, cancerígenas y tóxicas, que generalmente requieren más tiempo para entrar en el sistema linfático, por consiguiente no tienen oportunidad de hacerlo y se eliminan por las heces (Badui, 2006).



A: Fruto de níspero, B: Bagazo de carambola, C: Cáscara de mango, D: Salvado de trigo, E: Cáscara de cacao, F: Paja de arroz tratado con  $H_2O_2$ , G: Cáscara de *Diospyros kaki*, H: Raíz de *Polygonatum odoratum* tratado con vapor a  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , I: Bagazo de pomelo, J: Bagazo de limón, K: Bagazo de naranja, L: Concentrado de manzana, M: Hongo Siitake, N: Fruto de mango, O: Bagazo de coco, P: Pulpa de calabaza, M2: Hoja de *Agave americana* con expansión por explosión.

Fuente: Elaborada con datos de la Tabla 1.

Figura 12. Capacidad de hinchamiento de fibra de *Agave americana* comparado con otros productos

#### 4.3.1.4. Capacidad de absorción de grasa

La Tabla 9 muestra los valores de la capacidad de absorción de grasa (CAG) provenientes de los diferentes parámetros de estudio, siendo la variación en un rango de 3.49 a 4.16 g de aceite absorbida/g de fibra. Del análisis de varianza multifactorial del Anexo 10.3, se desprende que el factor presión en expansor (P), peso (p), humedad de fibra (H) y las interacciones tienen efecto estadísticamente significativo ( $P < 0.05$ ) en la capacidad de absorción de grasa.

El gráfico de interacción de factores del Anexo 10.5 indica que el efecto de mantener en su nivel bajo la presión en el expansor ( $110\text{ lbf/plg}^2$ ) y aumentar el

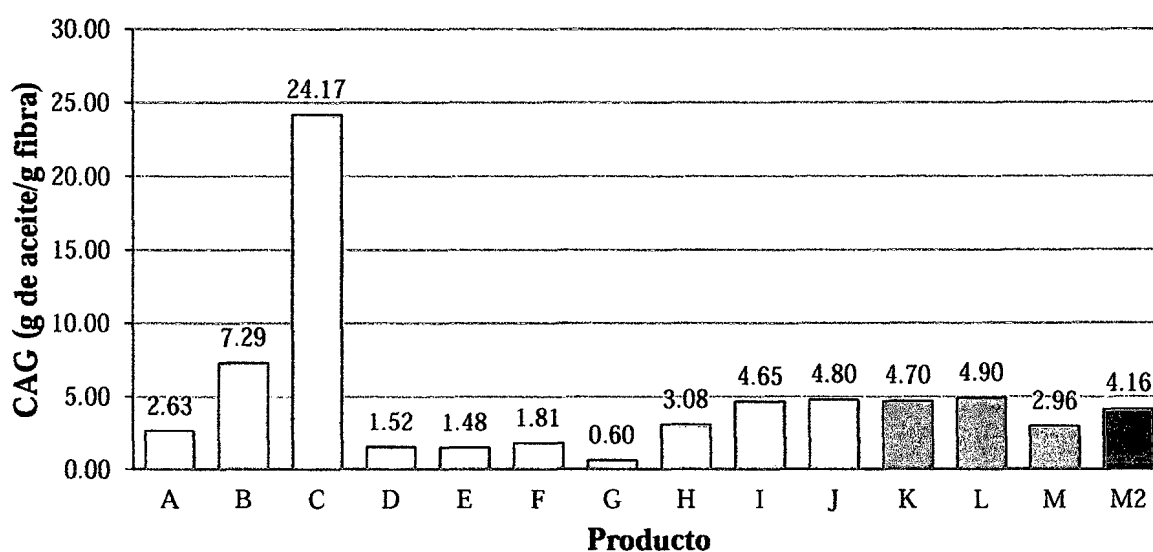
peso y humedad de la fibra en su nivel alto, 110 g y 62% respectivamente, incrementa la capacidad de absorción de grasa; siendo éstos los parámetros pertenecientes al tratamiento 7. Para la selección del mejor tratamiento se efectuaron el análisis de comparación de medias de Tukey tal como se muestra en el Anexo 10.2, lo cual reporta que el tratamiento 7, 1 y 2 son iguales estadísticamente. Así, según lo comentado anteriormente, el mejor caso encontrado considerando la coincidencia en el incremento de capacidad de absorción de agua, capacidad de retención de agua y capacidad de hinchamiento es el tratamiento 7, con parámetros de 110 lbf/plg<sup>2</sup>, 110 g y 62% de humedad.

El análisis de resultados permite deducir que los factores con mayor efecto son la presión en el expansor y la humedad de la fibra, con incidencia en el contenido de la lignina. Lan *et al.*, (2012) encontraron correlación positiva entre el contenido de fibra insoluble y la capacidad de absorción de grasa; en el presente estudio en la Tabla 9, se observa el incremento de la capacidad de absorción de grasa en los tratamientos 1, 7 y 8 cuyos valores de fibra detergente neutro fueron mayores respecto a los demás tratamientos con menor capacidad de absorción de grasa. La explicación de este hecho está relacionado con el mayor contenido de lignina que presenta dichos tratamientos (18.41, 12.80 y 8.42% respectivamente), confirmando lo señalado por Sosulsky y Cadden (1982), donde las fibras con alto contenido de lignina tiene un mayor valor de capacidad de absorción de grasa.

En la Figura 13 se muestra la comparación de la fibra de las hojas del maguey obtenida con expansión por explosión con otras fuentes de fibra. La fibra del maguey presentó una capacidad de absorción de grasa superior a la reportada de



bagazo de pomelo, limón y naranja, concentrado de manzana, hongo Siitake y hoja de *Agave tequilana* tratada con ácido clorhídrico; siendo inferior a la reportada para paja de arroz tratado con peróxido de hidrógeno, raíz de *Polygonatum odoratum* tratado con vapor a 100 °C, fruto de mango, bagazo de coco, hoja de *Agave tequilana* con tratada con proceso hidrotérmico, hoja de *Agave tequilana* tratado con presión de vapor de agua. Las diferencias en el valor de la capacidad de absorción de grasa puede ser debido al contenido de lignina (Lan *et al.*, 2012), la superficie y la naturaleza hidrófoba de las partículas de fibra (Navarro-González *et al.*, 2011).



A: Bagazo de carambola, B: Paja de arroz tratado con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, C: Raíz de *Polygonatum odoratum* tratado con vapor a 100 °C, D: Bagazo de pomelo, E: Bagazo de limón, F: Bagazo de naranja, G: Concentrado de manzana, H: Hongo Siitake, I: Fruto de mango, J: Bagazo de coco, K: Hoja de *Agave tequilana* con proceso hidrotérmico, L: Hoja de *Agave tequilana* tratado con presión de vapor de H<sub>2</sub>O, M: Hoja de *Agave tequilana* tratada con HCl, M2: Hoja de *Agave americana* tratada con expansión por explosión.

Fuente: Elaborada con datos de la Tabla 1.

Figura 13. Capacidad de absorción de grasa de fibra de *Agave americana* comparado con otros productos

#### 4.3.2. Determinación de fibra por métodos detergentes

La Tabla 10 muestra los valores de fibra detergente neutro (FDN) que provienen de la combinación de tres parámetros en estudio. Los valores fluctuaron en un rango de 53.22 hasta 58.61%, donde los tratamientos 1, 7 y 8 presentan valores altos.

El análisis de varianza multifactorial del Anexo 11.3 indica que la presión en el expansor (P), peso (p) y humedad de fibra (H) y las interacciones dobles son significativas ( $P < 0.05$ ); en tanto que la interacción triple no ejerció efectos significativos sobre el valor fibra detergente neutro. En el gráfico de interacción de factores del Anexo 11.5 se observa el incremento de fibra detergente neutro mediante dos posibles tratamientos, el primero manteniendo la presión en el expansor, peso y humedad de fibra en su nivel bajo, condiciones de operación del tratamiento 1; y el segundo manteniendo la presión en el nivel bajo y considerando el peso y humedad de la fibra en su nivel alto, parámetros que corresponden al tratamiento 7.

Del análisis anterior se puede deducir que el incremento de la presión en el expansor presenta efecto altamente negativo sobre la fibra detergente neutro, más aun cuando se disminuye la humedad de la fibra. El efecto se asocia a la disminución del porcentaje de lignina, que en el caso de tratamiento 1 es de un 18.41% y del tratamiento 2 un 2.25% (Tabla 10), lo que explica que a elevadas presiones la lignina es desnaturalizada a su forma digerible (Benítez, 2011), ocasionando la digestión y la eliminación en soluciones detergentes. Además, el porcentaje de fibra detergente neutro de la Tabla 10, en términos generales muestra una disminución de 58.61 a 53.22% a medida que la presión del proceso de

expandido aumenta, tendencia que se asemejan a los reportados por Sucari, (2003) donde señala que la cañihua variedad cupi sufre un descenso en su contenido de fibra cruda de 9.83 a 1.10%, mientras Tacora, (2010) en la misma variedad también reporta una disminución de 6.91 a 6.05%, quedando confirmado esta correlación inversa con el resultado reportado en granos de kiwicha que muestra un descenso de 5.84 a 3.53% (Castro, 1987).

Repo-Carrasco *et al.*, (2009) investigaron el efecto de la extrusión en el contenido de fibra dietética en dos variedades de kiwicha, encontrando disminución en el contenido de fibra insoluble durante la cocción por extrusión. El método de expansión por explosión es un proceso diferente a la extrusión, sin embargo existe la evidencia de una transformación de algunos componentes de la fibra insoluble en fibra soluble, causado por los posibles cambios en la estructura química de la fibra por acción de la presión en el expansor. Así como en la extrusión, la exposición a la tensión de cizallamiento y alta temperatura causa rotura del enlace químico, creando partículas más pequeñas que son solubles.

Tabla 10. Componentes de fibra detergente neutro obtenido con expansión por explosión

Trata- miento	Parámetros de estudio			Fibra detergente neutro (%) <sup>Ψ</sup>	Celulosa (%) <sup>£</sup>	Hemicelulosa (%) <sup>λ</sup>	Lignina (%) <sup>Φ</sup>
	P (lbf/pulg <sup>2</sup> )	p (g)	H (%)				
Control				57.99 ± 0.71	53.50	3.22	1.27
1	110	90	53	58.61 ± 0.51 <sup>a</sup>	36.72	3.48	18.41
2	130	90	53	54.77 ± 0.82 <sup>d</sup>	50.93	1.59	2.25
3	110	110	53	54.84 ± 0.23 <sup>d</sup>	43.87	1.86	9.10
4	130	110	53	53.22 ± 0.07 <sup>e</sup>	50.89	1.10	1.23
5	110	90	62	56.29 ± 0.47 <sup>bc</sup>	38.09	0.69	17.50
6	130	90	62	55.18 ± 0.05 <sup>cd</sup>	52.50	0.55	2.14
7	110	110	62	55.43 ± 0.77 <sup>bcd</sup>	42.13	0.50	12.80
8	130	110	62	56.63 ± 0.41 <sup>b</sup>	44.76	3.45	8.42

<sup>Ψ</sup> Valores de media ± desviación estándar de 3 repeticiones. Los datos con letras diferentes en la columna indican diferencias significativas estadísticamente entre los ocho tratamientos a un nivel de  $P \leq 0.05$  en la prueba de comparación múltiple de Tukey.

<sup>£</sup> Celulosa = FDA - LDA

<sup>λ</sup> Hemicelulosa = FDN - FDA

<sup>Φ</sup> Lignina = LDA

La comparación múltiple de medias del Anexo 11.2 señala que el tratamiento 1, 7 y 8 son diferentes estadísticamente ( $P < 0.05$ ), sin embargo el tratamiento 7 y 8 son iguales ( $P > 0.05$ ), es decir que son los segundos mejores tratamientos en mayor contenido de fibra detergente neutro después del tratamiento 1. Por otra parte, en el presente estudio no sólo se busca incrementar el contenido de fibra detergente neutro sino mejorar las propiedades funcionales. Bajo este criterio, respecto a las propiedades funcionales (capacidad de absorción y retención de agua, capacidad de hinchamiento y capacidad de absorción de grasa), el tratamiento 7 fue el que

incrementó con mayor eficiencia; por consiguiente se seleccionó dicho tratamiento como el mejor, siendo sus variables 110 lbf/plg<sup>2</sup>, 110 g y 62% de humedad y un valor de 55.43% de fibra detergente neutro.

El contenido de fibra detergente neutro que presentó el *Agave americana* (maguey) fueron mayores que las cáscaras de plátano (26.10%) reportados por Happi Emaga *et al.*, (2008), fibras de *Agave tequilana* Weber obtenida con proceso hidrotérmico (39.71%), presión de vapor de agua (46.74%), especie vegetal que pertenece al mismo género que el material en estudio (Vilcanqui, 2009), menor a la reportada en paja de arroz tratado con peróxido de hidrógeno (83.78%) (Sangnark y Noomhorm, 2004) y de fibras de *Agave tequilana* Weber obtenida con hidrólisis ácida (65.14%). Las variaciones en el contenido de fibra detergente neutro están relacionadas con la naturaleza de la fibra, especie vegetal y el método de procesamiento al que fue sometido (Rojas, 1994; Lan *et al.*, 2012; Sangnark y Noomhorm, 2004).

Respecto a las propiedades funcionales y el contenido de la fibra detergente neutro mediante los parámetros de obtención con expansión por explosión no se observaron una correlación, es decir, el mejor parámetro de expansión por explosión que aumenta el contenido de fibra detergente neutro no siempre mejora las propiedades funcionales.

#### 4.4. SELECCIÓN DE PARÁMETROS PARA LA OBTENCIÓN DE LA FIBRA

Los mejores parámetros del método hidrotérmico y expansión por explosión para la obtención de fibra de las hojas del maguey se seleccionaron de acuerdo al análisis de varianza multifactorial y la comparación de medias de Tukey que se realizaron



previamente en la parte de resultados y discusiones, teniendo en cuenta los mayores valores de las propiedades funcionales y el contenido de fibra detergente neutro. En la Tabla 11 los mejores parámetros del proceso hidrotérmico corresponden al tratamiento 8, mientras para expansión por explosión pertenecen al tratamiento 7.

Tabla 11. Parámetros seleccionados para la obtención de fibra de hojas del maguey mediante proceso hidrotérmico y expansión por explosión

Métodos de obtención de fibra	Parámetros de obtención seleccionados	Propiedades funcionales				Contenido de fibra detergente neutro (%)
		CAA (g/g)	CRA (g/g)	CH (mL/g)	CAG (g/g)	
Control		6.73	7.64	6.73	3.67	57.99
Proceso hidrotérmico	- Temperatura de agua = 90 °C					
	- Tiempo de inmersión = 15 minutos	7.32	9.65	9.94	4.02	71.21
	- Relación M:H <sub>2</sub> O = 1:2 p/v					
Expansión por explosión	- Presión en expansor = 110 lbf/plg <sup>2</sup>					
	- Peso de fibra = 110 g	6.74	7.74	6.73	4.16	55.43
	- Humedad de fibra = 62%					

Comparado los valores del proceso hidrotérmico y expansión por explosión (Tabla 11), se puede observar que la naturaleza de los parámetros de operación hace que los valores de las propiedades funcionales y el contenido de la fibra detergente neutro de hojas del maguey sean diferentes numéricamente. Para demostrar esta diferencia, se realizó una evaluación estadística comparativa de los datos de las propiedades funcionales y el contenido de fibra detergente neutro mediante la

prueba de *t de student* para muestras independientes, con un nivel de confianza de 95%. Los resultados del análisis estadístico del Anexo 12 confirman que ambos métodos de obtención de fibra son diferentes estadísticamente ( $P < 0.05$ ), evidenciando al proceso hidrotérmico como el mejor método de obtención de fibra de las hojas del maguey. Asimismo, se puede apreciar que el método de obtención influye sobre el contenido de fibra detergente neutro y sus propiedades funcionales.

Respecto a la comparación de la fibra de las hojas del maguey sin aplicación de los métodos de obtención (grupo de control) con los valores del mejor tratamiento seleccionado de las fibras obtenidas con método hidrotérmico y expansión por explosión, el análisis mediante la prueba de *t de Dunnett* que se muestra en el Anexo 20 reporta para el método hidrotérmico diferencias significativas estadísticamente ( $P < 0.05$ ) en todos los casos; es decir el método hidrotérmico mejoró la capacidad de absorción de agua, capacidad de retención de agua, capacidad de hinchamiento, capacidad de absorción de grasa y el contenido de fibra detergente neutro con un incremento de 8.77%, 26.31%, 47.70%, 9.54% y 22.80%, respectivamente. Sin embargo, cuando se comparó los datos del grupo control con los valores de fibras obtenidas con expansión por explosión la prueba de *t de Dunnett* reporta diferencias significativas estadísticamente ( $P < 0.05$ ) sólo para capacidad de retención de agua y capacidad de absorción de grasa con un incremento de 1.31% y 13.35%, respectivamente, demostrando que el método hidrotérmico es más eficiente que el método de expansión por explosión.

El uso del método hidrotérmico es recomendable en la concentración de fibra insoluble y mejora de propiedades funcionales debido a que el presente estudio el contenido de fibra detergente neutro fue mayor (71.21%) comparado con 39.71% en fibras de las hojas del *Agave tequilana* Weber (Vilcanqui, 2009), 26.10% en cáscara de plátano (Happi Emaga *et al.*, 2008) y 39.60 a 59.84% en subproductos de cítricos (Marín *et al.*, 2007); siendo corroborados por Akter *et al.*, (2010) donde la capacidad de hinchamiento en la fibra de la cáscara de *Diospyros kaki* tratadas con agua a 90 °C durante 2 minutos fueron mayores que las fibras sin tratar; asimismo Vasishtha y Srivastava, (2013) reportaron aumento de fibra insoluble en semillas de garbanzos. Los valores superiores tanto del contenido de fibra detergente neutro y propiedades funcionales de las fibras del maguey obtenidas con método hidrotérmico permite perspectivas promisorias para el aprovechamiento de esta planta silvestre en la industria alimentaria y fomentar su cultivo en lugares con pocas utilidades agrícolas y carentes de riego.



## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. CONCLUSIONES

- En la obtención de fibra a partir de las hojas del maguey mediante el proceso hidrotérmico; el tratamiento 8 con los parámetros de 90 °C, 15 minutos y 1:2 de relación materia prima: agua (p/v) son los que permitieron mayor contenido de fibra detergente neutro (71.21%) y las mejores propiedades funcionales expresadas en capacidad de absorción de agua (7.32 g de agua absorbida/g fibra), capacidad de retención de agua (9.65 g de agua retenida/g fibra), capacidad de hinchamiento (9.94 mL de incremento/g fibra) y capacidad de absorción de grasa (4.02 g de aceite absorbido/g fibra).
- En la obtención de fibra a partir de las hojas del maguey con expansión por explosión; el tratamiento 7 con los parámetros de 110 lbf/plg<sup>2</sup>, 110 g de fibra y 62% de humedad son los que permitieron mayor contenido de fibra detergente neutro (55.43%) y las mejores propiedades funcionales expresadas en capacidad de absorción de agua (6.74 g de agua absorbida/g fibra), capacidad de retención de agua (7.74 g de agua retenida/g fibra), capacidad de hinchamiento (6.73 mL de incremento/g fibra) y capacidad de absorción de grasa (4.16 g de aceite absorbido/g fibra).
- En el proceso de obtención de fibra a partir de las hojas del maguey por los métodos hidrotérmico y expansión por explosión, los factores de temperatura de agua y presión en el expansor respectivamente son los que ejercen mayor influencia sobre el contenido de fibra detergente neutro y las propiedades funcionales.

- Las fibras obtenidas a partir de las hojas del maguey por el proceso hidrotérmico son los que permiten mejores propiedades funcionales y mayor contenido de fibra detergente neutro con respecto al método de expansión por explosión.
- La fibra obtenida de las hojas del maguey mediante el proceso hidrotérmico correspondiente al tratamiento 8 están constituidos por 46.62% de celulosa, 21.03% de hemicelulosa y 3.55% de lignina; mientras en expansión por explosión correspondiente al tratamiento 7 está conformados por 42.13% de celulosa, 0.50% de hemicelulosa y 12.80% de lignina.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- Determinar los parámetros óptimos de procesamiento para la obtención de fibra de las hojas del maguey mediante el método hidrotérmico.
- El uso de la fibra obtenida con proceso hidrotérmico se recomienda en la formulación de productos que requieran de una apariencia de humedad y propiedades emulsionantes (productos cárnicos, rellenos de pasteles y productos de panificación).
- El uso de la fibra obtenida con expansión por explosión se recomienda en la formulación de productos secos (galletas y cereales para desayuno).
- Evaluar el nivel de sustitución parcial de fibra de las hojas del maguey obtenida mediante proceso hidrotérmico en alimentos con apariencia de humedad y propiedades emulsionantes en función de la aceptabilidad sensorial.



## BIBLIOGRAFIA

1. AACC. 2001. The definition of dietary fiber. American Association of Cereal Chemist Report. *Cereal Food World*, 46 (3): 112 – 126.
2. Ahmad, U.V.; Basha, A. 2006. Spectroscopic Data of Steroid Glycosides: Stigmastanes, Furostanes, Spirtostanes. (1-3 vols.). Springer-Verlag. New York, USA.
3. Akin, D.E. 2010. Chemistry of plant fibres. In: Industrial applications of natural fibres. Edited by Jörg Müssig. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 13-22.
4. Akter, S.; Ahmed, M.; Eun, J.B. 2010. Dietary fibre components, antioxidant activities and hydration properties of ripe persimmon (*Diospyros kaki* L. cv. Daebong) peel powders as affected by different washing treatments. *International Journal of Food Science and Technology*, 45: 1464 – 1471.
5. Alcázar, del Castillo J. 2002. Diccionario técnico de industrias alimentarias. Cibercopy Impresiones Offset, Segunda edición, Cusco, Perú. 722p.
6. Alfonzo, G.G.C. 2000. Efecto del tratamiento térmico sobre el contenido de fibra dietética total, soluble e insoluble en algunas leguminosas. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 50(3): 281 – 285.
7. Almeida, L.E.; Chang, K.Y.; Steel, J.C. 2013. Dietary fibre sources in bread: Influence on technological quality. *LWT – Food Science and Technology*, 50: 545 – 553.
8. Al-Sheraji, S.H.; Ismail, A.; Manap, M.Y.; Mustafa, S.; Yusof, R.M.; Hassan, F.A. 2011. Functional properties and characterization of dietary fiber from *Mangifera pajang* Kort fruit pulp. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59: 3980 – 3985.
9. Amen, R.J.; Spiller, G.A. 1999. Tecnología de las fibras alimenticias. En: Elementos de tecnología de alimentos. Norman W. Desrosier, Avi Publishing Company, Compañía Editorial Continental, Décimo Cuarta Reimpresión, México, pp. 49-51.



10. Anajwala, C.C.; Patel, R.M.; Dakhara, S.L.; Jariwala, J.K. 2010. In vitro cytotoxicity study of *Agave americana*, *Strychnos nuxvomica* and *Areca catechu* extracts using MCF-7 cell line. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*, 1(2): 245 – 252.
11. Anchorena Matienzo, Patricia. 1995. Aplicación de jugo de maguey (*Agave americana* L.) como biofertilizante en el cultivo de la papa. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Agrónomo. Universidad Autónoma Tomás Frías, Potosí, Bolivia.
12. Anderson, A.P. 1902. U.S. Patent No. 707,892. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
13. Ankom Technology. 2008a. Method for Neutral Detergent Fiber in Feeds.
14. Ankom Technology. 2008b. Method for Acid Detergent Fiber in Feeds.
15. AOAC International. 2002. Official methods of analysis of AOAC International. Association of Official Analytical Chemist, 17th edition, Gaithersburg, MD. USA.
16. Bach Knudsen, K.E. 2001. The nutritional significance of dietary fibre analysis. *Animal Feed Science and Technology*, 90: 3 – 20.
17. Badui, D.S. 2006. Química de los Alimentos. Pearson Educación, Cuarta Edición, México. 736p.
18. Bautista, Cruz Nelson. 2006. Estudio químico – bromatológico y elaboración de néctar de aguamiel de *Agave americana* L. (maguey) procedente de Ayacucho. Tesis para optar el Título Profesional de Químico Farmacéutico. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. 89p.
19. Behall, K.M.; Scholfield, D.J.; Hallfrisch, J.G.; Liljeberg-Elmstahl, E.G. 2006. Consumption of both resistant starch and  $\beta$ -glucan improves postprandial plasma glucose and insulin in women. *Diabetes Care*, 29: 976-981.
20. BeMiller, J.N.; Whistler, R.L. 2000. Carbohidratos. En: Química de los alimentos. Editado por Owen R. Fennema. Editorial Acribia S.A., Segunda edición, Zaragoza, España, pp. 187 – 267.



21. Benítez, García Vanesa. 2011. Caracterización de subproductos de cebolla como fuente de fibra alimentaria y otros compuestos bioactivos. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Madrid, España. 282p.
22. Borchani, C.; Besbes S.; Masmoudi M.; Ali, B.M.; Blecker, C. 2012. Influence of oven-drying temperature on physicochemical and functional properties of date fibre concentrates. *Food and Bioprocess Technology*, 5: 1541 – 1551.
23. Borchani, C.; Besbes, S.; Masmoudi, M.; Blecker, C.; Paquot, M.; Attis, H. 2011. Effect of drying methods on physic-chemical and antioxidant properties of date fibre concentrates. *Food Chemistry*, 125: 1194 – 1201.
24. Brack, E.A. 1999. Diccionario enciclopédico de plantas útiles del Perú. CBC-Centro de Estudios Regionales Andinos Bartolomé de Las Casas, Cuzco, Perú. 556p.
25. Burkitt, D.P.; Trowell, H. 1975. Some implications of dietary fiber. *Academic London*, 2: 1408 – 1412.
26. Buttriss, J.L.; Stokes, C.S. 2008. Dietary fibre and health: an overview. *British Nutrition Foundation Nutrition Bulletin*, 33: 186-200.
27. Capitani, M.I.; Spotorno, V.; Nolasco, S.M.; Tomás, M.C. 2012. Physicochemical and functional characterization of by-products from chia (*Salvia hispanica* L.) seeds of Argentina. *LWT – Food Science and Technology*, 45: 94 – 102.
28. Caprez, A.; Arrigoni, E.; Amado, R. and Neukom, H. 1986. Influence of different types of thermal treatment on the chemical composition and physical properties of wheat bran. *Journal of Cereal Science*, 4: 233 – 239.
29. Castro Vicente, Clara A. 1987. Procesamiento de la kiwicha (*Amaranthus caudatus*) por el método de expansión por explosión. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero en Industrias Alimentarias. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. 134p.
30. Chau, C.F.; Chen, C.H.; Lee, M.H. 2004. Characterization and physicochemical properties of some potential fibre derived from *Averrhoa carambola*. *Nahrung/Food*, 48(1): 43 – 46.



31. Chea, A.; Jonville, Marie-Caroline; Bun, S.S.; Laget, M.; Elias, R.; Duménil, G.; Balansard, G. 2007. In vitro antimicrobial activity of plants used in cambodian traditional medicine. *The American Journal of Chinese Medicine*, 35(5): 867 – 873.
32. Córdova, Sequiera Arturo. 2005. Caracterización de propiedades relacionadas con la textura de suspensiones de fibras alimentarias. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. 215p.
33. Cortínez, Villalobos Victoria A. 2010. Comparación de pretratamientos en residuos forestales para la producción de bioetanol de segunda generación: hidrólisis ácida y líquidos iónicos. Tesis de Maestría. Universidad de Chile. 133p.
34. Daniel, M. 2006. Medicinal Plants: Chemistry and Properties. Science Publishers, Enfield, NH, USA, Printed in India. 270p.
35. De la Cruz, H.; Vilcapoma, G.; Zevallos, P.A. 2007. Ethnobotanical study of medicinal plants used by the Andean people of Canta, Lima, Perú. *Journal of Ethnopharmacology*, 111: 284 – 294.
36. Deepak, S.A.; Oros, G.; Sathyanarayana, S.G.; Shetty, H.S.; Sashikanth, S. 2007. Antisporulant activity of watery extracts of plants against *Sclerospora Graminicola* causing downy mildew disease of pearl millet. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 2(1): 36 – 42.
37. Deepak, S.A.; Oros, G.; Sathyanarayana, S.G.; Shetty, N.P.; Shetty, H.S.; Sashikanth, S. 2005. Antisporulant activity of leaf extracts of Indian plants against *Sclerospora Graminicola* causing downy mildew disease of pearl millet. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 38(1): 31 – 39.
38. Dhingra, D.; Michael, M.; Rajput, H.; Patil, R.T. 2012. Dietary fibre in foods: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 49(3): 255 – 266.
39. Díaz, Rubio Elena M. 2008. Fibra dietética en bebidas de la dieta. Determinación, composición, y contribución a la ingesta de fibra. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid, España. 331p.



40. Elleuch, M.; Bedigian, D.; Roiseux, O.; Besbes, S.; Bleker, C.; Attia, H. 2011. Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: Characterisation, technological functionality and commercial applications: A review. *Food Chemistry*, 124: 411 - 421.
41. Escalada Pla, M.F.; Ponce, N.M.; Stortz, C.A.; Gerschenson, L.N.; Rojas, A.M. 2007. Composition and functional properties of enriched fiber products obtained from pumpkin (*Curcubita moschata* Duchesne ex Poiret). *Lebensmittel Wissenschaft-und-Technologie*, 40: 1176 – 1185.
42. FAO/WHO Codex Alimentarius Commission. 2009. Report of the 30th session of the Codex Committee on nutrition and foods for special dietary uses. ALINORM 09/32/26. Disponible en el sitio de red: [https://www.ccnfsdu.de/fileadmin/user\\_upload/PDF/2008/al32\\_26e.pdf](https://www.ccnfsdu.de/fileadmin/user_upload/PDF/2008/al32_26e.pdf) [Revisado el 10 de Noviembre del 2010].
43. Fennema. 2000. Agua y hielo. En: Química de los alimentos. Editado por Owen R. Fennema. Editorial Acribia S.A., Segunda edición, Zaragoza, España, pp. 19 – 109.
44. Figuerola, F.; Hurtado, M.L.; Estévez, A.M.; Chiffelle, I.; Asenjo, F. 2005. Fibre concentrates from Apple pomace and citrus peel as potential fibre for food enrichment. *Food Chemistry*, 91: 395 – 401.
45. Fuentes-Alventosa, J.M.; Rodríguez-Gutiérrez, G.; Jaramillo-Carmona, S.; Espejo-Calvo, J.A.; Rodríguez-Arcos, R.; Fernández-Bolaños, J.; Guillén-Bejarano, R.; Jiménez-Araujo, A. 2009. Effect of extraction method on chemical composition and functional characteristics of high dietary fibre powders obtained from asparagus by-products. *Food Chemistry*, 113: 665 – 671.
46. García, O.O.; Infante, R.B.; Rivera, C.J. 2009. Las leguminosas, una fuente importante de fibra alimentaria: Una visión en Venezuela. *Revista del Instituto Nacional de Higiene "Rafael Rangel"*, 40(1): 57 – 63.
47. González, E.M. y Galván, V.R. 1992. El maguey (*Agave* Spp.) y los tepehuanes de Durango. *Cactáceas y Suculentas Mexicanas*, 37(1): 3 – 10.



48. Guillot, O.D.; Der, M.P.V. 2006. Claves para los distintos taxones cultivados como ornamentales en la Península Ibérica e Islas Baleares de la especie *Agave americana* L. *Bouteloua*, 1(11): 13-20.
49. Guillot, O.D.; Van Der, M.P.; Laguna, L.E.; Rosselló, P.J.A. 2009. El género *Agave* L. en la flora alóctona valenciana. Monografías de la revista *Bouteloua*, No. 3. Jolube Consultor y Editor Ambiental, Valencia, España. 94p.
50. Guleria, S.; Kumar, A. 2009. Antifungal activity of *Agave americana* leaf extract against *Alternaria brassicae*, causal agent of *Alternaria* blight of Indian mustard (*Brassica juncea*). *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 42(4): 370 – 375.
51. Gutiérrez, P.H.; De la Vara, S.R. 2004. Análisis y diseño de experimentos. McGraw-Hill/Interamericana Editores, México. 571p.
52. Haard, N.F.; Chism, G.W. 2000. Características de los tejidos vegetales comestibles. En: Química de los alimentos. Editado por Owen R. Fennema. Editorial Acribia S.A., Segunda edición, Zaragoza, España, pp. 1117 – 1199.
53. Hanco, M.J.; Palao, I.A.; Bravo, P.R. 2010. Estudio y evaluación del contenido de plomo total en alimentos procesados en expansores tipo batch tradicionales y prototipo rediseñado. *CienciAgro*, 2(1): 181 – 187.
54. Happi Emaga, T.; Robert, C.; Ronkart, SN.; Wathélet, B.; Paquot, M. 2008. Dietary fibre components and pectin chemical features of peels during ripening in banana and plantain varieties. *Bioresource Technology*, 99: 4346 – 4354.
55. Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI. 1994. Perfil agropecuario de la Región Apurímac. Lima. Perú.
56. Izydorczyk, M.; Cui, S.W.; Wang, Q. 2005. Polysaccharide gums: Structures, functional properties, and applications. In: Food carbohydrates: Chemistry, Physical Properties, and Applications. Steve W. Cui, editor, Taylor & Francis Group, LLC, USA.



57. Jin, J.M.; Liu, X.K.; Teng, R.W.; Yang, C.R. 2002a. Two New Steroidal Glycosides from Fermented Leaves of *Agave americana*. *Chinese Chemical Letters*, 13 (7): 629 - 632.
58. Jin, J.M.; Liu, X.K.; Yang, C.R. 2002b. A New Pregnane Glycoside from Fermented Leaves of *Agave americana*. *Chinese Chemical Letters*, 13 (12): 1189 - 1192.
59. Jin, J.M.; Liu, X.K.; Yang, C.R. 2003a. Three new hecogenin glycosides from fermented leaves of *Agave americana*. *Journal of Asian Natural Products Research*, 5 (2): 95 - 103.
60. Jin, J.M.; Yang, C.R. 2003b. Two New Sperostanol Steroidal Sapogenins from Fermented Leaves of *Agave americana*. *Chinese Chemical Letters*, 14 (5): 491 - 494.
61. Jin, J.M.; Zhang, Y.J.; Yang, C.R. 2004. Four New Steroid Constituents from the Waste Residue of Fibre Separation from *Agave americana* Leaves. *Chemical & Pharmaceutical Bulletin*, 52(6): 654 - 658.
62. Khade, K.V.; Dubey, H.; Tenpe, C.R.; Yeole, P.G.; Patole, A.M. 2011. Anticancer activity of the ethanolic extracts of *Agave americana* leaves. *Pharmacologyonline*, 2: 53 - 68.
63. Khare, C.P. 2007. Indian Medicinal Plants. And Illustrated Dictionary. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg. 812p.
64. Kumar, D.; Kumar, A.; Prakash, O. 2012. Potential antifertility agents from plants: A comprehensive review. *Journal of Ethnopharmacology*, 140: 1 - 32.
65. Lan, G.; Chen, H.; Chen, S.; Tian, J. 2012. Chemical composition and physicochemical properties of dietary fiber from *polygonatum odoratum* as affected by different processing methods. *Food Research International*, 49: 406 - 410.
66. Larrauri, J.A.; Goñi, I.; Martín-Carrón, N.; Rupérez, P.; Saura-Calixto, F. 1996. Measurement of health-promoting properties in fruti dietary fibres: antioxidant capacity, fermentability and glucosa retardation index. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71: 515 - 519.
67. Lázaro, A.G.; García, MF. 2010. Corticosteroides tópicos. *Información Terapéutica del Sistema Nacional de Salud*, 34: 83 - 88.



68. Lecumberri, E.; Mateos, R.; Izquierdo-Pulido, M.; Rupérez, P.; Goya, L.; Bravo, L. 2007. Dietary fibre composition, antioxidant capacity and physico-chemical properties of a fibre-rich product from cocoa (*Theobroma cacao* L.). *Food Chemistry*, 104: 948–954.
69. Leterme, P.; Froidmont, E.; Rossi, F.; Théwis, A. 1998. The high water-holding capacity of pea inner fibers affects the ileal flow of endogenous amino acids in pigs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46: 1927 – 1934.
70. López, G.; Ros, G.; Rincón, F.; Periago, M.J.; Martínez, M.C.; Ortuño, J. 1996. Relationship between physical and hydration properties of soluble and insoluble fiber of artichope, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44: 2773 – 2778.
71. Lunn, J.; Buttriss, J.L. 2007. Carbohydrates and dietary fibre. *British Nutrition Foundation Nutrition Bulletin*, 32: 21 – 64.
72. Macía, M.J. 2006. Las plantas de fibra. En: Botánica Económica de los Andes Centrales. Editado por Moraes, M.R; Øllgaard, B; Kvist, L.P; Borchsenius, F; & Balslev, H., Universidad Mayor de San Andrés, La Paz. pp. 370 – 384.
73. Madhuri, S.; Pandey, G. 2009. Some anticancer medicinal plants of foreign origin. *Current Science*, 96(6): 779 – 783.
74. Mahato, S.B.; Ganguly, A.N.; Sahu, N.P. 1982. Steroid Saponins. *Phytochemistry*, 21 (5): 959 – 978.
75. Marín, F.R.; Soler-Rivas, C.; Benavente-García, O.; Castillo, J.; Pérez-Alvarez, J.A. 2007. By-products from different citrus processes as a source of customized functional fibres. *Food chemistry*, 100: 736 – 741.
76. Martínez-Alcalá, Ángeles G. 2012. Producción de bioetanol: mejora del proceso a partir de grano de cereal y de biomasa lignocelulósica tratada con steam explosión. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid, España. 237p.
77. Martínez-Flores, H.E.; Maya-Cortés, D.C.; Figueroa-Cárdenas, J.D.; Garnica-Romo, M.G.; Ponce-Saavedra, J. 2009. Chemical composition and physicochemical properties of shiitake mushroom and high fiber products. *CyTA – Journal of Food*, 7(1): 7 – 14.



78. Mateos-Aparicio, Inmaculada C. 2008. Aprovechamiento de subproductos de leguminosas para la obtención de productos funcionales. Comparación de metodologías para la caracterización de la fibra alimentaria. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid, España. 235p.
79. Maxwell, D.L. y Holohan, J.L. 1999. Cereales para desayuno. En: Elementos de tecnología de alimentos. Editado por Norman W. Desrosier. Compañía Editorial Continental, Décimo Cuarta Reimpresión, México, pp. 188-194.
80. Miuki Saito, Irene. 2005. Produção de hidrolisados e fibras a partir de resíduo da industrialização da mandioca submetido a pré-tratamento hidrotérmico. Tesis doctoral. Universidad Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, Brasil. 97p.
81. Molina, M.M.; Martín, I.A. 2007. La fibra dietética procesada como alimento funcional. *Nutrición*, 26:70-77.
82. Navarro-González, I.; García-Valverde, V.; García-Alonso, J.; Periago, J. 2011. Chemical profile, functional and antioxidant properties of tomato peel fiber. *Food Research International*, 44: 1528 – 1535.
83. Norat, T.; Bingham, S.; Ferrari, P.; *et al.* 2005. Meat, fish, and colorectal cancer risk: the european prospective investigation into cancer and nutrition. *Journal of the National Cancer Institute*, 97: 906–916.
84. Olivera, D.J.H.; Toranzo, F.J.M.; Beltrán, S.B. 1997. Estudio comparativo entre ibuprofeno dexametasona y betametasona en el control del edema postoperatorio en cirugía de terceros molares retenidos. *Revista ADM*, 54(2): 88 – 91.
85. Pardo, B.O. 2005. El Agave Americano (*Agave americana* L.): Uso alimentario en el Perú. *Chloris Chilensis*, 8(2): 1 – 22.
86. Parmar, V.S.; Jha, H.N.; Gupta, A.K.; Prasad, A.K. 1992. Agamanone, a flavanone from *Agave americana*. *Phytochemistry*, 31 (7): 2567 – 2568.
87. Pereira, M.A.; O'reilly, E.; Augustsson, K.; *et al.*, 2004. Dietary fiber and risk of coronary heart disease: A pooled analysis of cohort studies. *Archives of Internal Medicine*, 164: 370 - 376.



88. Priego Mendoza, Nerio. 2007. Obtención de fibra dietética a partir de sáculos de naranja aplicando un tratamiento con vapor. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero en Alimentos. Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, México. 64p.
89. Raghavendra, S. N.; Ramachandra Swamy, S. R.; Rastogi, N. K.; Raghavarao, K. S. M. S.; Kumar, S.; Tharanathan, R. N. 2006. Grinding characteristics and hydration properties of coconut residue: A source of dietary fiber. *Journal of Food Engineering*, 72: 281 – 286.
90. Raghavendra, S.N.; Rastogi, N.K.; Raghavarao, K.S.M.S.; Tharanathan, R.N. 2004. Dietary fiber from coconut residue: effects of different treatments and particle size on the hydration properties. *European Food Research and Technology*, 218: 563 – 567.
91. Reddy, N.; Yang, Y. 2005. Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications. *Trends in Biotechnology*, 23(1): 22 – 27.
92. Repo-Carrasco, V.R.; Peña, J.; Salminen, S. 2009. Dietary fiber and other functional components in two varieties of crude and extruded kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Journal of Cereal Science*, 49: 219 – 224.
93. Reynoso, S.R.; García, M.J.A.; López, B.W.; López, L.A. 2012. Identificación taxonómica de las especies de agave utilizadas para la elaboración del licor Comiteco en Chiapas. Centro de Investigación Regional Pacífico Sur. Folleto técnico No. 14, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-SAGARPA, Oaxaca, México. 35p.
94. Rivera, G.; Bocanegra-García, V.; Monge, A. 2010. Traditional plants as source of functional foods: a review. *CyTA – Journal of Food*, 8(2): 159 – 167.
95. Robertson, J.A.; De Monredon, F.D.; Dysseler, P.; Guillon, F.; Amado, R.; Thibault, J.F. 2000. Hydration properties of dietary fibre and resistant starch: a european collaborative study. *Lebensmittel Wissenschaft-und-Technologie*, 33: 72 – 79.



96. Rodríguez, García Isabel M. 2006. Caracterización química de fibras de plantas herbáceas utilizadas para la fabricación de pastas de papel de alta calidad. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla, España. 184p.
97. Rodríguez, Sevilla María D. 1993. Influencia del tratamiento térmico en la fibra alimentaria y azúcares solubles de productos vegetales. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid, España. 427p.
98. Rojas, H.E. 1994. La fibra dietética. En: Los carbohidratos en la nutrición humana. España, pp. 119-137.
99. Rosas-Taraco, A.; Sanchez, E.; García, S.; Heredia, N.; Bhatnagar, D. 2011. Extracts of *Agave americana* inhibit aflatoxin production in *Aspergillus parasiticus*. *World Mycotoxin Journal*, 4(1): 37 – 42.
100. Rubin, E.M. 2008. Genomics of cellulosic biofuels. *Nature*, 454: 841 – 845.
101. Rupérez, P.; Saura-Calixto, F. 2001. Dietary fibre and physicochemical properties of edible Spanish seaweeds. *European Food Research and Technology*, 212: 349 – 354.
102. Sánchez, Guzmán Balbina S. 2005. Caracterización fisicoquímica y funcional de la fibra dietética del fruto de níspero (*Eriobotrya japonica*) y de la cáscara de mango obo (*Mangifera indica* L). Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero en Alimentos. Universidad Tecnológica de la Mixteca, Mexico. 65p.
103. Sangnark, A.; Noomhorm, A. 2004. Chemical, physical and baking properties of dietary fiber prepared from rice straw. *Food Research International*, 37: 66 – 74.
104. Schulze, B.M.; Simin, L.; Rimm, B.E.; Manson, E.J., Willett, C.W., Hu, B.F. 2004. Glycemic index, glycemic load, and dietary fiber intake and incidence of type 2 diabetes in younger and middle-aged women. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 80: 348 – 356.
105. Scott, K.P.; Duncan, S.H.; Flint, H.J. 2008. Dietary fibre and the gut microbiota. *British Nutrition Foundation Nutrition Bulletin*, 33: 201 – 211.
106. Sharma, H.; Parihar, L.; Parihar, P. 2011. Review on cancer and anticancerous properties of some medicinal plants. *Journal of Medicinal Plants Research*, 5(10): 1818 – 1835.



107. Siddhapura, S.; Maharshi, A.; Thaker, V. 2011. Varietal difference in antifungal activity of some species of *Agave*. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 44(2): 135 – 141.
108. Slavin, J.; Green, H. 2007. Dietary fibre and satiety. *British Nutrition Foundation Nutrition Bulletin*, 32: 32-42.
109. Slavin, J.; Jacobs, D.R. 2010. Dietary fiber: All Fibers Are Not Alike. In: *Nutrition Guide for Physicians*. Edited by Wilson, T.; Norman, T.J.; Bray, G.A.; Struble, M.B. Humana Press, Springer Science, New York, USA. pp. 13 – 24.
110. Slavin, J.L. 2005. Dietary fiber and body weight. *Nutrition*, 21: 411 – 418.
111. Sosulsky, F.W.; Cadden, A.M. 1982. Composition and physiological properties of several sources of dietary fiber. *Journal of Food Science*, 47(5): 1472 – 1477.
112. SPSS, Inc. 2009. PASW Statistics 18. Versión 18.0.0. [www.spss.com](http://www.spss.com)
113. StatPoint Technologies, Inc. 2010. Statgraphics Centurion XVI. Versión 16.1.11. [www.statgraphics.com](http://www.statgraphics.com)
114. Sucari, Jaén Maribel L. 2003. Determinación de humedad y presión en el proceso de expansión por explosión para dos variedades de cañihua (*Chenopodium pallidicaule Aellen*). Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Agroindustrial. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú. 116p.
115. Sun, Y.; Chen, J. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource Technology*, 83: 1–11.
116. Tacora, C.R.L.; Luna, M.G.; Bravo, P.R.; Mayta, H.J.; Choque, Y.M.; Ibañez, Q.V. 2010. Efecto de la presión de expansión por explosión y temperatura de tostado en algunas características funcionales y fisicoquímicas de dos variedades de cañihua (*Chenopodium Pallidicaule Aellen*). *Journal de Ciencia y Tecnología Agraria*, 2(1): 188 – 198.
117. Taiz, L.; Zeiger, E. 2006. Fisiología vegetal. Volumen II. Universitat Jaume I. Publicacions. 581p.



118. Takahashi, T.; Furuichi, Y.; Mizuno, T.; Kato, M.; Tabara, A.; Kawada, Y.; Hirano, Y.; Kubo, K.; Onozuka, M.; Kurita, O. 2009. Water-holding capacity of insoluble fibre decreases free water and elevates digesta viscosity in the rat. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89: 245 – 250.
119. Tanongkankit, Y.; Chiewchan, N.; Devahastin, S. 2012. Physicochemical property changes of cabbage outer leaves upon preparation into functional dietary fiber powder. *Food and Bioproducts Processing*, 90: 541 – 548.
120. Tapsell, L.C. 2004. Diet and metabolic syndrome: where does resistant starch fit in?. *Journal Association Analytical Chemist International*, 87(3):756–760.
121. Tharanathan, R.N.; Mahadevamma, S. 2003. Grain Legumes: A boon to human nutrition. *Trends in Food Science & Technology*, 14: 507 - 518.
122. Thiede, J. 2001. Agavaceae. In: *Illustrated Handbook of Succulent Plants: Monocotyledons*. Edited by Urs Eggli, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, pp. 5 – 102.
123. Tiwari, U.; Cummis, E. 2011. Functional and physicochemical properties of legume fibers. In: *Pulse Foods: Processing, Quality and Nutraceutical Applications*. Edited by Tiwari, B.K.; Gowen, A.; McKenna, B. Elsevier Inc. Burlington, USA, pp. 121 – 156.
124. Torres, G.F.; Salgado, S.M.; Livera, A.V; Guerra, N.B. 2006. Efeito do processo hidrotérmico sobre o teor de fibra alimentar em hortaliças. *B.CEPPA Curitiba*, 24(2): 337 – 346.
125. Tortora, G.J.; Derrickson, B. 2007. *Principios de Anatomía y Fisiología*. 11a Edición. Editorial Medica Panamericana, México. 1220p.
126. Tosh, S.M.; Yada, S. 2010. Dietary fibres in pulse seeds and fractions: Characterization, functional attributes, and applications. *Food Research International*, 43: 450 – 460.



127. Trinidad, T.P.; Mallillin, A.C.; Valdez, D.H.; Loyola, A.S.; Askali-Mercado, F.C.; Castillo, J.C.; Encabo, R.R.; Masa, D.B.; Maglaya, A.S.; Chua, M.T. 2006. Dietary fiber from coconut: a functional food. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 7: 309 – 317.
128. Valencia, G.F.E.; Román, M.M.O. 2006. Caracterización fisicoquímica y funcional de tres concentrados comerciales de fibra dietaria. *VITAE, Revista de la Facultad de Química Farmacéutica*, 13(2): 54 - 60.
129. Van Horn, L.; Mccoin, M.; Kris-Etherton, P.M.; *et al.* 2008. The evidence for dietary prevention and treatment of cardiovascular disease. *Journal of the American Dietetic Association*, 108: 287-331.
130. Van Soest, P.J.; Robertson, J.B.; Lewis, B.A. 1991. Symposium: Carbohydrate methodology, metabolism, and nutritional implications in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 74: 3583 - 3597.
131. Vasishtha, H.; Srivastava, R.P. 2013. Effect of soaking and cooking on dietary fibre components of different type of chickpea genotypes. *Journal of Food Science and Technology*, 50(3): 579 – 584.
132. Vázquez-García, J.A; Cházaro, M.B.; Hernández, V.G.; Vargas-Rodríguez, Y.L.; Zamora, T.P. 2007. Taxonomía del género *Agave* (Agavaceae) en el occidente de México: una panorámica preliminar. En: *Agaves del occidente de México*. Editado por: Vázquez-García, J.A. y Vargas-Rodríguez, Y.L. Universidad de Guadalajara, México. Pp. 145 – 191.
133. Venero, G.J.L. 2006. Formas de Uso del Maguey (*Agave americana*) en el humedal Lucre-Hucacarpay, Cusco, Perú. *Chloris Chilensis*, 9(2):1 – 15.
134. Vilcanqui, Pérez Fulgencio. 2009. Extracción y caracterización funcional de la fibra de las hojas del *Agave tequilana* Weber destinados para la inclusión en alimentos. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León, México. 119p.
135. Villarroel, M.; Acevedo, C.; Yañez, E.; Biolley E. 2003. Propiedades funcionales de la fibra del musgo *Sphagnum magellanicum* y su utilización en la formulación de productos de panadería. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 53: 400-407.



136. Viuda-Martos, M.; López-Marcos, M.C.; Fernández-López, J.; Sendra, E.; López-Vargas, J.H.; Pérez-Álvarez, J.A. 2010. Role of fiber in cardiovascular diseases: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9: 240 – 258.
137. Waldron, K.W.; Parker, M.L.; Smith, A.C. 2003. Plant cell walls and food quality. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2:101 – 119.
138. Whistler, R.L. 1999. Tecnología de los carbohidratos. En: Elementos de Tecnología de Alimentos. Norman W. Desrosier, Avi Publishing Company, Compañía Editorial Continental, Décimo Cuarta Reimpresion, Mexico, pp. 42 – 49.
139. Wilkomirski, B.; Bobeyko, V.A.; Kintia, P.K. 1975. New steroidal saponins of *Agave americana*. *Phytochemistry* 14: 2657 – 2659.
140. Zang, J.; Wang, Z.W.; Shi, X.M. 2010. *Canna edulis* Ker By-product: Chemical Composition and Characteristics of the Dietary Fiber. *Food Science and Technology International*, 16 (4): 305 – 313.
141. Zarzuelo, Z.A.; Gálvez, P.J. 2010. Fibra dietética. En: Tratado de Nutrición. Tomo I. Bases Fisiológicas y Bioquímicas de la Nutrición. Editado por Gil, H.A y Sánchez, C.M.F. 2ª Edición, Editorial Médica Panamericana S.A., Madrid, España. pp. 233 – 256.
142. Zhang, M.; Bai, X.; Zhang, Z. 2011. Extrusion process improves functionality of soluble dietary fiber in oat bran. *Journal of Cereal Science*, 54: 98 - 103
143. Zhu, K.; Huang, S.; Peng, W.; Qian, H.; Zhou, H. 2010. Effect of ultrafine grinding on hydration and antioxidant properties of wheat bran dietary fiber. *Food Research International*, 43: 943 – 948.
144. Zia-ur-Rehman; Shah, W.H. 2004. Domestic processing effects on some insoluble dietary fibre components of various legumes. *Food Chemistry*, 87: 613 – 617.



## ANEXOS



## ANEXO 1

## COMPUESTOS QUÍMICOS AISLADOS DE LAS HOJAS DE MAGUEY

Componentes	Fuente	Referencia
Hecogenina	Hoja, semilla	Brack, 1999; Daniel, 2006
Clorogenina	Hoja, flor	Brack, 1999; Daniel, 2006
5-alfa, 25D-spiroston-3beta-ol-12-ona	Hoja	Brack, 1999
Clorogenin-5 alfa	Hoja	Brack, 1999
25D-spiroston-3beta, 6 alfa diol	Hoja	Brack, 1999
Ácido piscídico	Hoja	Brack, 1999; Daniel, 2006
Agave saponina C	Hoja	Brack, 1999
Glucosa	Hoja	Brack, 1999
Galactosa	Hoja	Brack, 1999
Xilosa	Hoja	Brack, 1999
Ramnosa	Hoja	Brack, 1999
2,3,4,6-tetra-O-metil-D-galactosa	Hoja	Brack, 1999
2,3,6-tri-O-metil-D-glucosa	Hoja	Brack, 1999
Tipogenina	Hoja	Brack, 1999; Daniel, 2006
9-dehidrohecogenina	Hoja	Brack, 1999; Daniel, 2006
Rockogenina	Hoja	Brack, 1999; Daniel, 2006
12-epirockogenina	Hoja	Brack, 1999
Gitogenina	Hoja	Brack, 1999
Agavósido A	Hoja	Brack, 1999; Mahato <i>et al.</i> , 1982
Agavósido B	Hoja	Brack, 1999; Mahato <i>et al.</i> , 1982
Agavósido C	Hoja	Brack, 1999; Mahato <i>et al.</i> , 1982
Agavósido C'	Hoja	Brack, 1999
Agavósido D	Hoja	Brack, 1999
Agavósido E	Hoja	Brack, 1999
Agavósido I	Hoja	Brack, 1999
Agavasaponina E	Hoja	Brack, 1999; Wilkomirski <i>et al.</i> , 1975
Agavasaponina H	Hoja	Brack, 1999; Wilkomirski <i>et al.</i> , 1975
Saponina G	Hoja	Brack, 1999
Mavalonato kinasa	Hoja	Brack, 1999
Agave saponina C'	–	Mahato <i>et al.</i> , 1982
Agave saponina D	–	Mahato <i>et al.</i> , 1982
Agavósido G	–	Mahato <i>et al.</i> , 1982

## ANEXO 1. (Continuación)

Componentes	Fuente	Referencia
Agave americana glycoside 1	Hoja fermentada	Jin <i>et al.</i> , 2002b; Ahmad y Basha, 2006
Agave americana saponin 1	Hoja	Ahmad y Basha, 2006
Agave americana saponin d	Hoja	Ahmad y Basha, 2006
Agamanone	Hoja	Parmar <i>et al.</i> , 1992
Agamanenoside A	Hoja fermentada	Jin <i>et al.</i> , 2002a
Agamanenoside B	Hoja fermentada	Jin <i>et al.</i> , 2002a
Agamanenoside D	Hoja fermentada	Jin <i>et al.</i> , 2003a
Agamanenoside F	Hoja fermentada	Jin <i>et al.</i> , 2003a
Agamanenoside H	Hoja	Jin <i>et al.</i> , 2004
Agamanenoside J	Hoja	Jin <i>et al.</i> , 2004
Agavegenin A	Hoja fermentada	Jin y Yang, 2003b
Agavegenin B	Hoja fermentada	Jin y Yang, 2003b
Agavegenin D	Hoja	Jin <i>et al.</i> , 2004
Keemferol 3-glucósido	Flor	Brack, 1999; Daniel, 2006
Keemferol 3-rutinósido	Flor	Brack, 1999
Mevalonato kinasa	Flor	Brack, 1999
Aminopeptidasa	Escapo	Brack, 1999
Lisina	Escapo	Brack, 1999
Leucina	Escapo	Brack, 1999
Isoleucina	Escapo	Brack, 1999
Sucrosa	Escapo	Brack, 1999

## ANEXO 2

**RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA CAPACIDAD DE  
ABSORCIÓN DE AGUA EN LA FIBRA OBTENIDA MEDIANTE PROCESO  
HIDROTÉRMICO**

**2.1. Tabla de análisis de varianza para comparación de tratamientos**

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fo	P-valor	Sig
Entre grupos	7	2.72856	0.38979	191.702	0.0000	**
Intra grupos	16	0.03253	0.002033			
Total	23	2.7611				

GL: grados de libertad; SC: Suma de cuadrados; CM: cuadrados medios; Fo: valor calculado de F; P-valor: Valor de P obtenido en software estadístico; NS: No significativo; \*Significativo; \*\*Altamente significativo.

**2.2. Tabla de la prueba de comparación múltiple de Tukey**

Tratamiento	n	Subconjunto para alfa = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
2	3	6.1700						
1	3		6.3533					
3	3			6.4900				
4	3				6.6367			
6	3				6.7567	6.7567		
5	3					6.8467	6.8467	
7	3						6.9200	
8	3							7.3233
Sig		1.000	1.000	1.000	0.073	0.0285	0.515	1.000

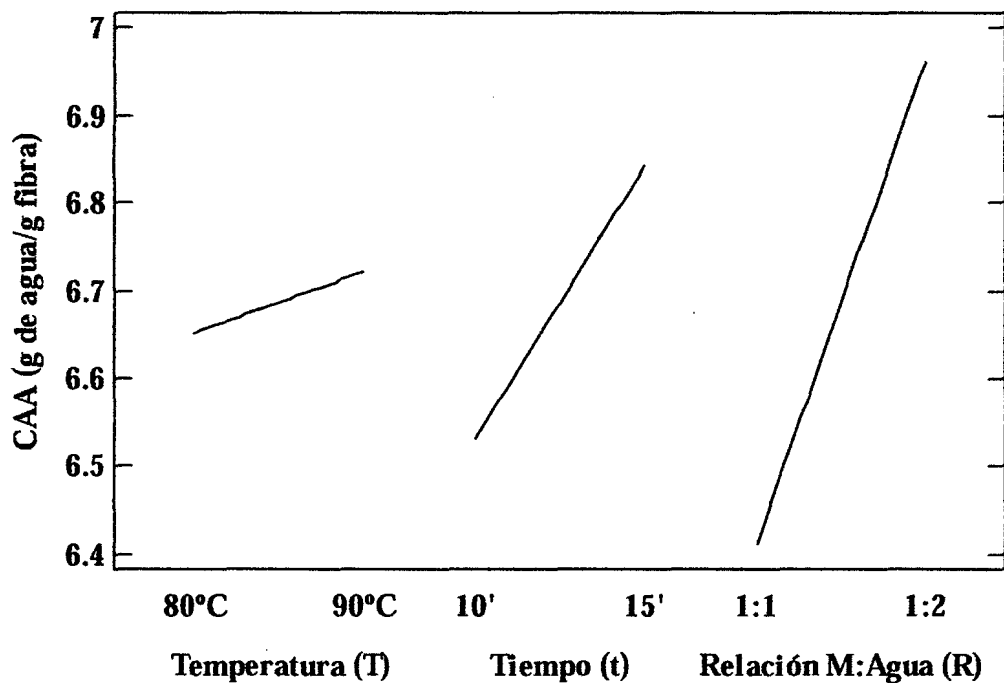
**2.3. Tabla de análisis de varianza multifactorial**

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fo	P-valor	Sig
T: Temperatura de agua	1	0.028704	0.028704	14.117	0.0017	*
t: Tiempo de inmersión	1	0.579704	0.579704	285.100	0.0000	**
R: Relación M:agua	1	1.8095	1.8095	889.920	0.0000	**
T x t	1	0.254204	0.254204	125.018	0.0000	**
T x R	1	0.045937	0.045937	22.592	0.0002	*
t x R	1	0.000504	0.000504	0.248	0.6253	NS
T x t x R	1	0.010004	0.010004	4.920	0.0414	*
Error	16	0.032533	0.002033			
Total	23	2.7611				

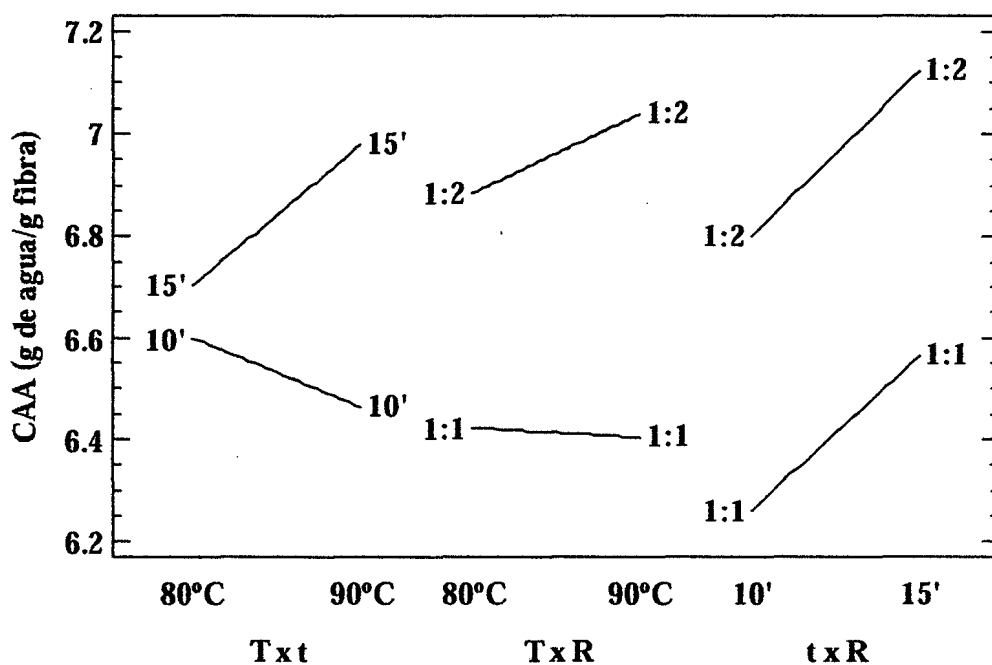
$R^2 = 98.82\%$ ;  $R^2_{aj} = 98.31\%$ ;  $CV = 0.67\%$ .



#### 2.4. Gráfico de efectos principales



#### 2.5. Gráfico de interacción de factores



## ANEXO 3

**RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA CAPACIDAD DE  
RETENCIÓN DE AGUA EN LA FIBRA OBTENIDA MEDIANTE PROCESO  
HIDROTÉRMICO**

**3.1. Tabla de análisis de varianza para comparación de tratamientos**

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fo	P-valor	Sig
Entre grupos	7	4.64625	0.6637	14.146	0.0000	**
Intra grupos	16	0.75073	0.0469			
Total	23	5.3969				

GL: grados de libertad; SC: Suma de cuadrados; CM: cuadrados medios; Fo: valor calculado de F; P-valor: Valor de P obtenido en software estadístico; NS: No significativo; \*Significativo; \*\*Altamente significativo.

**3.2. Tabla de la prueba de comparación múltiple de Tukey**

Tratamiento	n	Subconjunto para alfa = 0.05				
		1	2	3	4	
1	3	8.4967				
6	3	8.8400	8.8400			
3	3	8.9667	8.9667	8.9667		
5	3		9.3467	9.3467	9.3467	
4	3			9.4633	9.4633	
8	3				9.6500	
7	3				9.7133	
2	3				9.8100	
Sig		0.205	0.146	0.161	0.218	

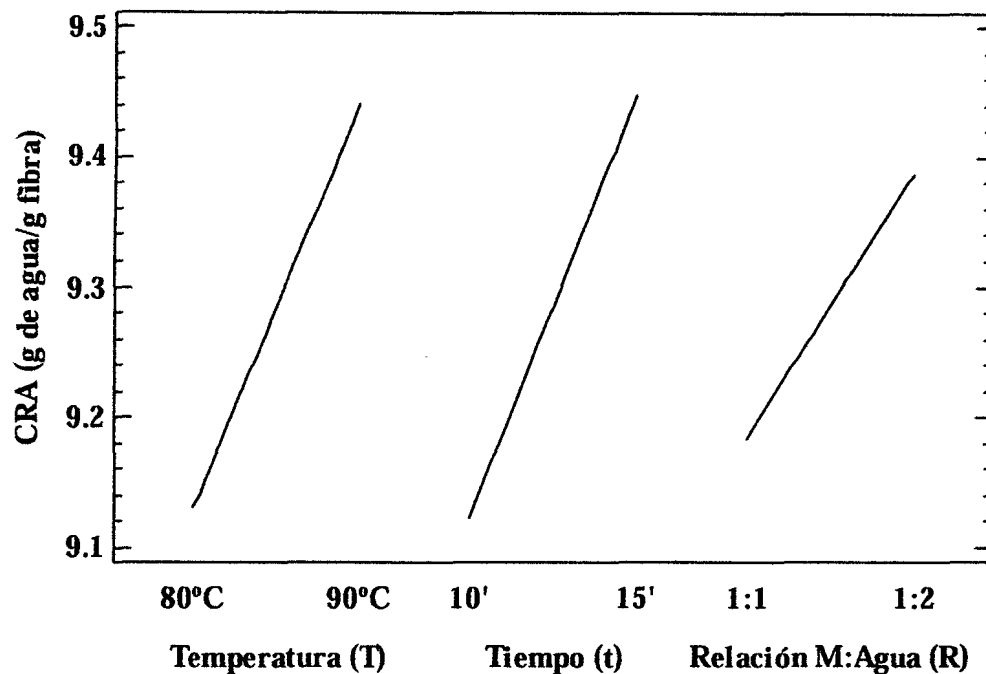
**3.3. Tabla de análisis de varianza multifactorial**

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fo	P-valor	Sig
T: Temperatura de agua	1	0.5766	0.5766	12.289	0.0029	*
t: Tiempo de inmersión	1	0.63375	0.63375	13.507	0.0020	*
R: Relación M:agua	1	0.248067	0.248067	5.287	0.0353	*
T x t	1	0.052266	0.052266	1.114	0.3069	NS
T x R	1	2.12415	2.12415	45.271	0.0000	*
t x R	1	0.416067	0.416067	8.867	0.0089	*
T x t x R	1	0.59535	0.59535	12.688	0.0026	*
Error	16	0.750733	0.046920			
Total	23	5.39698				

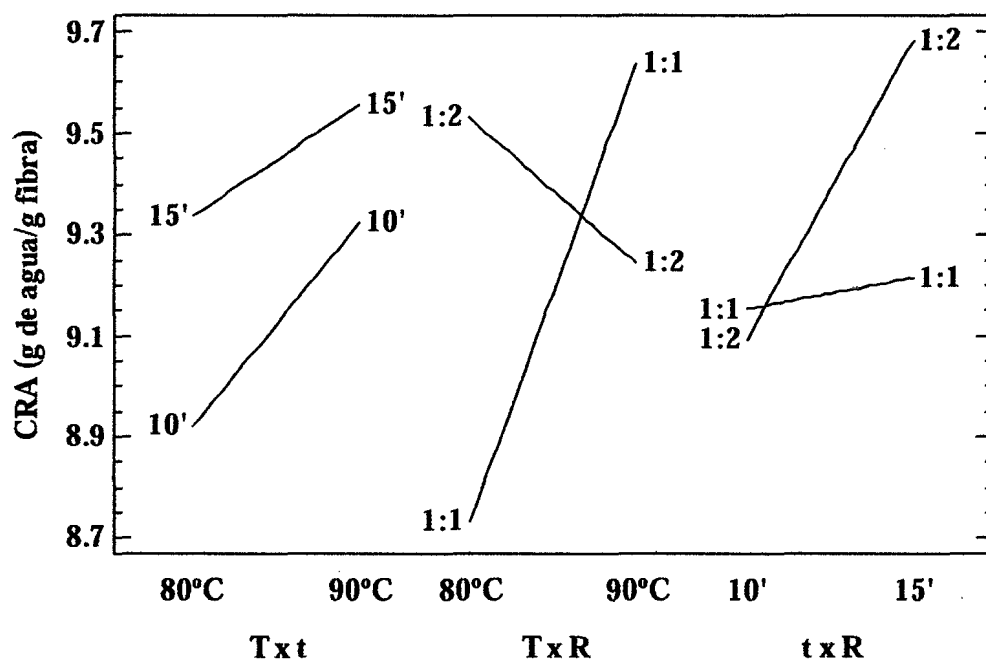
$R^2 = 86.09\%$ ;  $R^2_{aj} = 80.00\%$ ;  $CV = 2.33\%$ .



### 3.4. Gráfico de efectos principales



### 3.5. Gráfico de interacción de factores



## ANEXO 4

**RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA CAPACIDAD DE  
HINCHAMIENTO EN LA FIBRA OBTENIDA MEDIANTE PROCESO  
HIDROTÉRMICO**

**4.1. Tabla de análisis de varianza para comparación de tratamientos**

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fo	P-valor	Sig
Entre grupos	7	23.8123	3.40176	4144.28	0.0000	**
Intra grupos	16	0.01313	0.000820			
Total	23	23.8255				

GL: grados de libertad; SC: Suma de cuadrados; CM: cuadrados medios; Fo: valor calculado de F; P-valor: Valor de P obtenido en software estadístico; NS: No significativo; \*Significativo; \*\*Altamente significativo.

**4.2. Tabla de la prueba de comparación múltiple de Tukey**

Tratamiento	n	Subconjunto para alfa = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
3	3	7.2400						
1	3		7.7267					
4	3			8.7300				
5	3				9.0067			
7	3					9.2267		
2	3					9.2467		
8	3						9.9400	
6	3							10.4733
Sig		1.000	1.000	1.000	1.000	.986	1.000	1.000

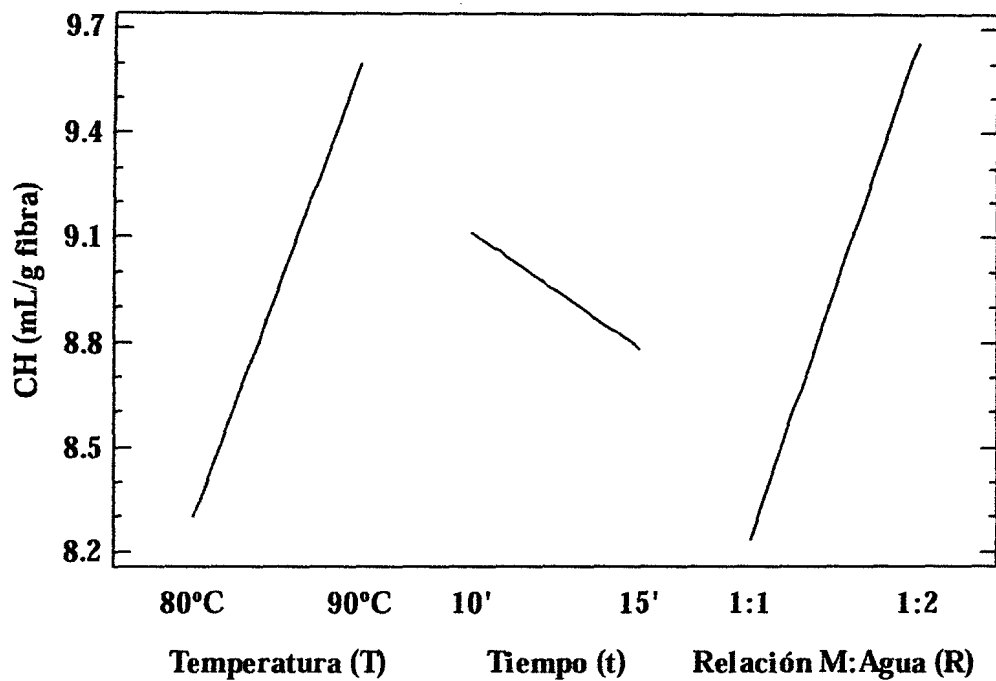
**4.3. Tabla de análisis de varianza multifactorial**

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fo	P-valor	Sig
T: Temperatura de agua	1	10.101	10.101	12305.83	0.0000	**
t: Tiempo de inmersión	1	0.650104	0.650104	792.01	0.0000	**
R: Relación M:agua	1	12.198	12.198	14860.51	0.0000	**
T x t	1	0.230104	0.230104	280.33	0.0000	**
T x R	1	0.258337	0.258337	314.73	0.0000	**
t x R	1	0.178538	0.178538	217.51	0.0000	**
T x t x R	1	0.196204	0.196204	239.03	0.0000	**
Error	16	0.013133	0.000820			
Total	23	23.8255				

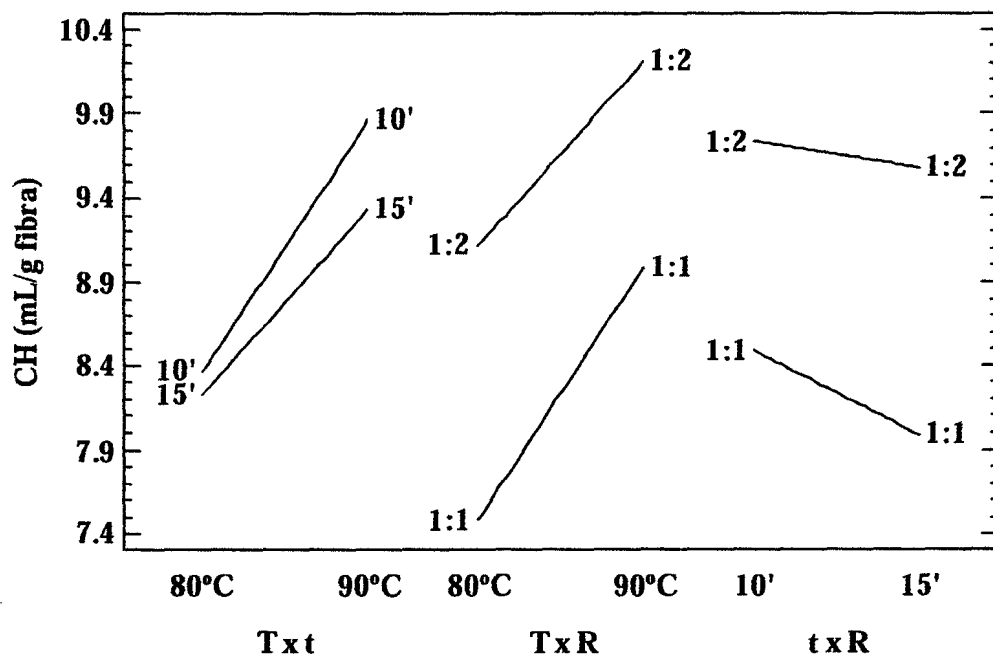
$R^2 = 99.94\%$ ;  $R^2_{aj} = 99.92\%$ ;  $CV = 0.32\%$ .



#### 4.4. Gráfico de efectos principales



#### 4.5. Gráfico de interacción de factores



## ANEXO 5

**RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA CAPACIDAD DE  
ABSORCIÓN DE GRASA EN LA FIBRA OBTENIDA MEDIANTE PROCESO  
HIDROTÉRMICO**

**5.1. Tabla de análisis de varianza para comparación de tratamientos**

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fo	P-valor	Sig
Entre grupos	7	1.9669	0.2809	194.905	0.0000	**
Intra grupos	16	0.0230	0.0014			
Total	23	1.9899				

GL: grados de libertad; SC: Suma de cuadrados; CM: cuadrados medios; Fo: valor calculado de F; P-valor: Valor de P obtenido en software estadístico; NS: No significativo; \*Significativo; \*\*Altamente significativo.

**5.2. Tabla de la prueba de comparación múltiple de Tukey**

Tratamiento	n	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
5	3	3.1467			
2	3	3.2467	3.2467		
3	3	3.2467	3.2467		
4	3		3.2567		
1	3		3.2600		
7	3		3.2967		
6	3			3.7367	
8	3				4.0167
Sig		0.077	0.737	1.000	1.000

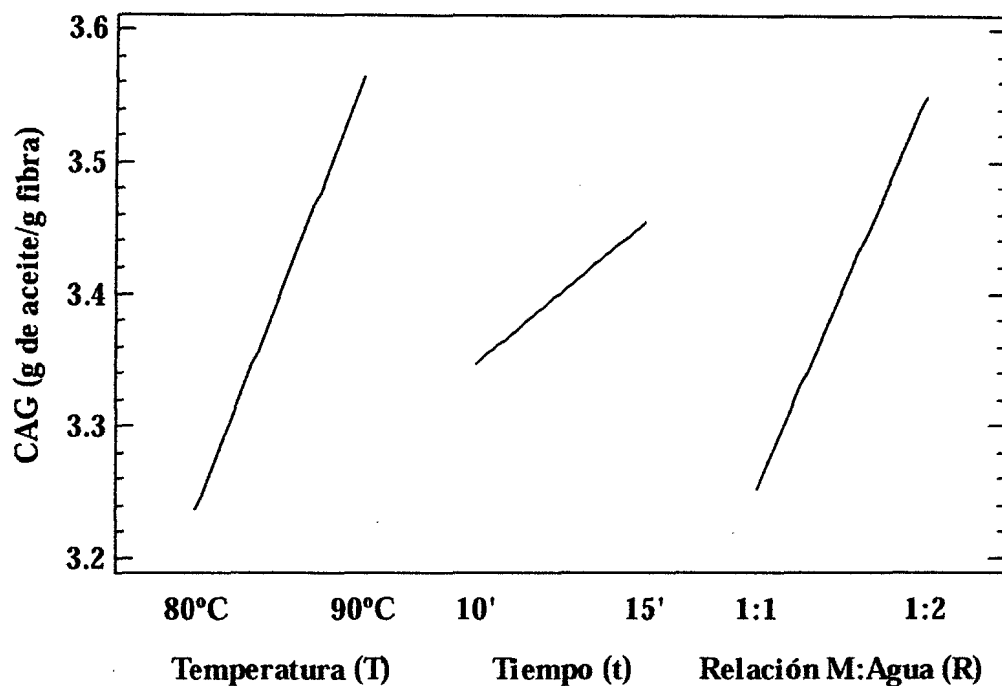
**5.3. Tabla de análisis de varianza multifactorial**

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fo	P-valor	Sig
T: Temperatura de agua	1	0.640267	0.640267	444.116	0.0000	**
t: Tiempo de inmersión	1	0.068266	0.068266	47.353	0.0000	**
R: Relación M:agua	1	0.528067	0.528067	366.289	0.0000	**
T x t	1	0.008816	0.008816	6.116	0.0250	*
T x R	1	0.646817	0.646817	448.659	0.0000	*
t x R	1	0.070416	0.070416	48.844	0.0089	*
T x t x R	1	0.004266	0.004266	2.960	0.1047	NS
Error	16	0.023066	0.001441			
Total	23	1.98998				

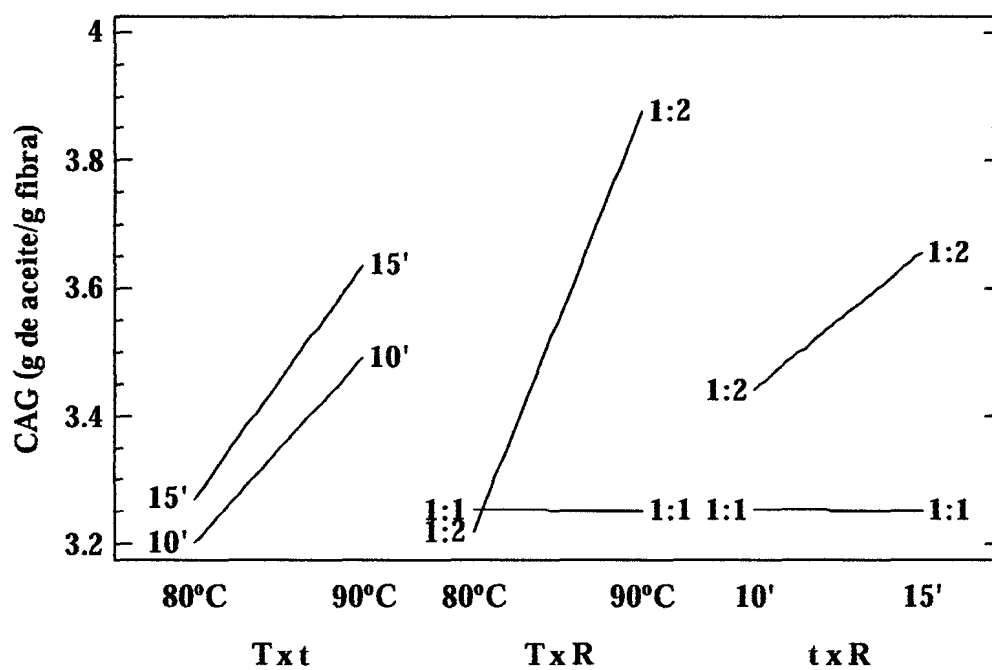
$R^2 = 98.84\%$ ;  $R^2_{aj} = 98.33\%$ ;  $CV = 1.10\%$ .



#### 5.4. Gráfico de efectos principales



#### 5.5. Gráfico de interacción de factores



## ANEXO 6

### RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CONTENIDO DE FIBRA DETERGENTE NEUTRO OBTENIDA MEDIANTE PROCESO HIDROTÉRMICO

#### 6.1. Tabla de análisis de varianza para comparación de tratamientos

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fo	P-valor	Sig
Entre grupos	7	1557.284	222.469	90.902	0.0000	**
Intra grupos	16	39.1575	2.4473			
Total	23	1596.442				

GL: grados de libertad; SC: Suma de cuadrados; CM: cuadrados medios; Fo: valor calculado de F; P-valor: Valor de P obtenido en software estadístico; NS: No significativo; \*Significativo; \*\*Altamente significativo.

#### 6.2. Tabla de la prueba de comparación múltiple de Tukey

Tratamiento	n	Subconjunto para alfa = 0.05				
		1	2	3	4	5
1	3	49.4167				
5	3	52.9300	52.9300			
7	3		54.5767	54.5767		
3	3			58.6533		
2	3				66.3067	
6	3				67.8333	67.8333
4	3					70.7800
8	3					71.2100
Sig		0.177	0.890	0.082	0.922	0.210

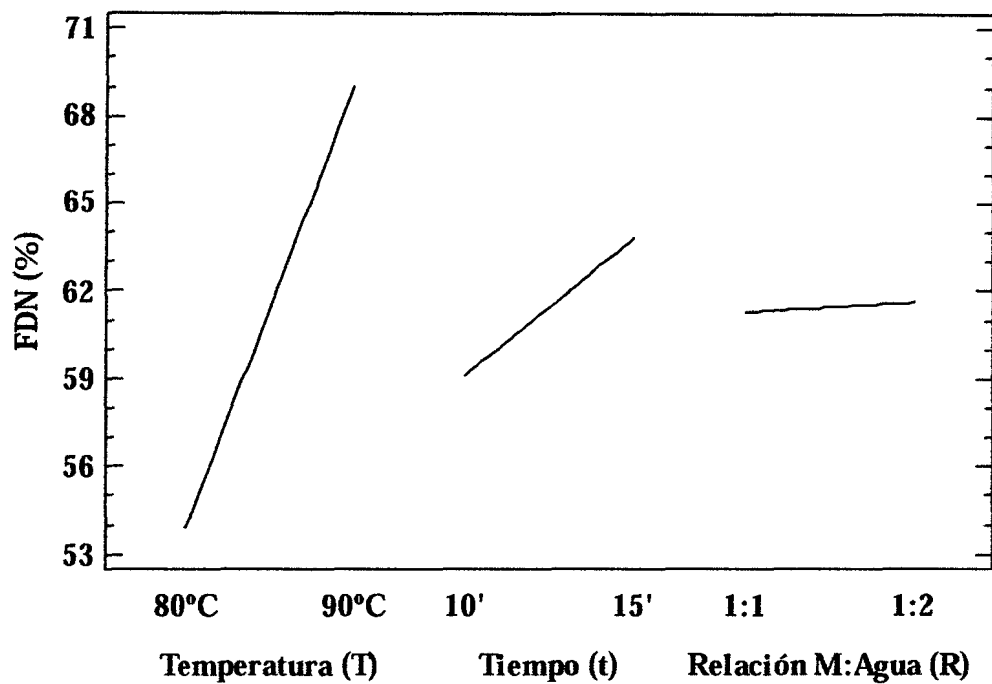
#### 6.3. Tabla de análisis de varianza multifactorial

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fo	P-valor	Sig
T: Temperatura de agua	1	1375.01	1375.01	561.839	0.0000	*
t: Tiempo de inmersión	1	131.60	131.60	53.773	0.0000	*
R: Relación M:agua	1	0.728017	0.728017	0.297	0.5930	NS
T x t	1	3.45042	3.45042	1.410	0.2524	NS
T x R	1	2.3814	2.3814	0.973	0.3386	NS
t x R	1	28.2968	28.2968	11.562	0.0037	*
T x t x R	1	15.8113	15.8113	6.461	0.0218	*
Error	16	39.1575	2.44735			
Total	23	1596.44				

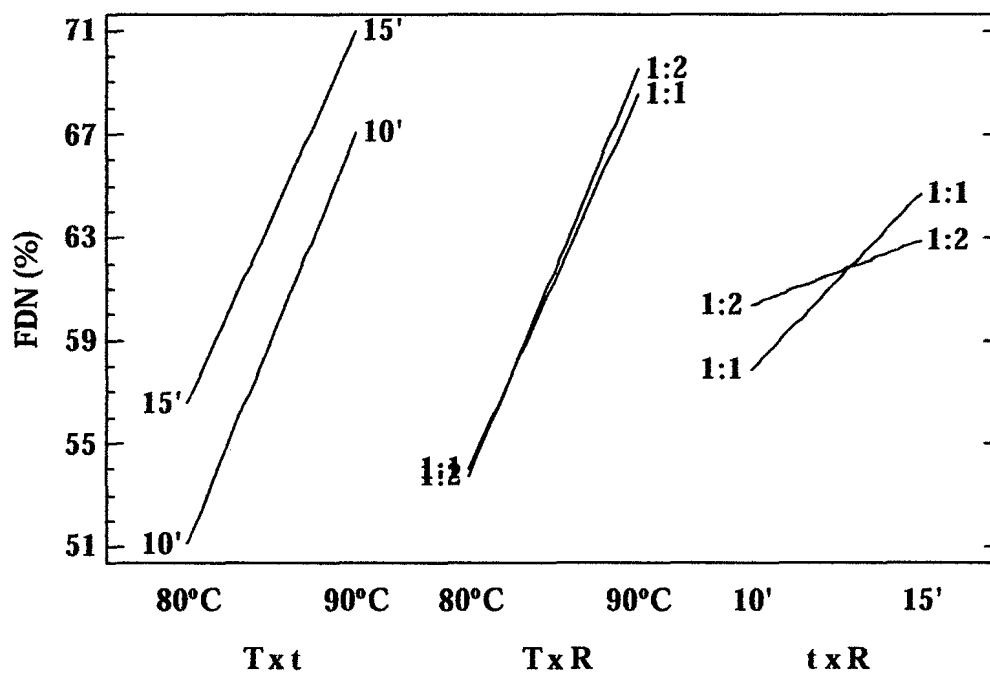
$R^2 = 97.55\%$ ;  $R^2_{aj} = 96.47\%$ ;  $CV = 2.55\%$ .



#### 6.4. Gráfico de efectos principales



#### 6.5. Gráfico de interacción de factores



## ANEXO 7

**RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA CAPACIDAD DE  
ABSORCIÓN DE AGUA EN LA FIBRA OBTENIDA CON EXPANSIÓN POR  
EXPLOSIÓN**

**7.1. Tabla de análisis de varianza para comparación de tratamientos**

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fo	P-valor	Sig
Entre grupos	7	2.6854	0.3836	287.727	0.0000	**
Intra grupos	16	0.0213	0.0013			
Total	23	2.7067				

GL: grados de libertad; SC: Suma de cuadrados; CM: cuadrados medios; Fo: valor calculado de F; P-valor: Valor de P obtenido en software estadístico; NS: No significativo; \*Significativo; \*\*Altamente significativo.

**7.2. Tabla de la prueba de comparación múltiple de Tukey**

Tratamiento	n	Subconjunto para alfa = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
8	3	5.5800						
3	3		5.9067					
5	3			6.1167				
1	3			6.1500				
4	3				6.2667			
2	3					6.3700		
6	3						6.5067	
7	3							6.7367
Sig		1.000	1.000	1.000	0.943	0.0285	0.515	1.000

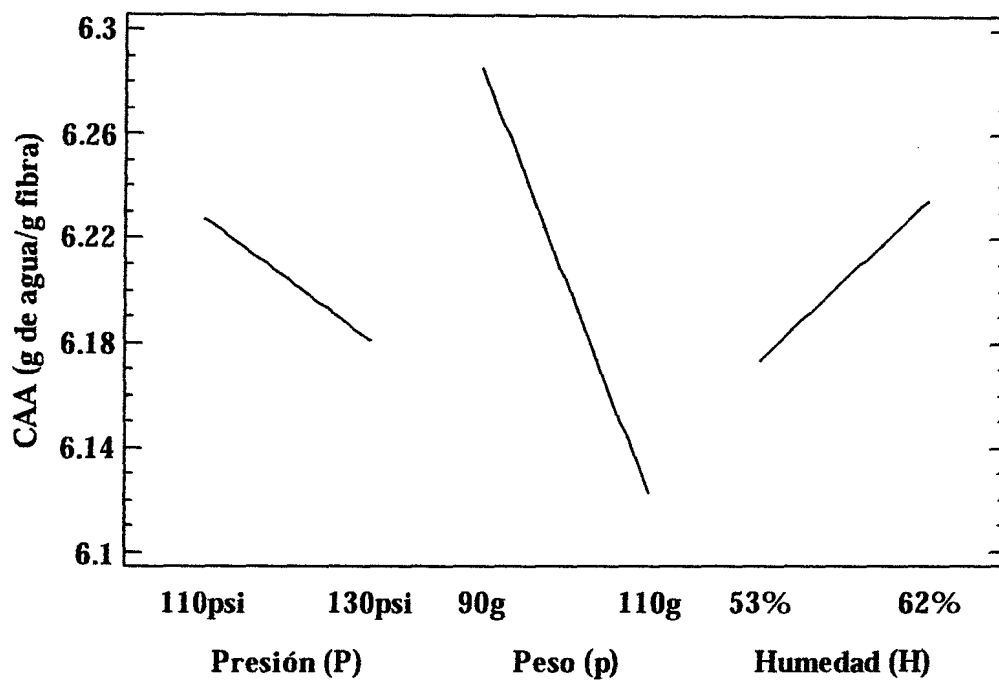
**7.3. Tabla de análisis de varianza multifactorial**

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fo	P-valor	Sig
P: Presión en expansor	1	0.013066	0.013066	9.800	0.0065	*
p: Peso de fibra	1	0.160067	0.160067	120.050	0.0000	*
H: Humedad de fibra	1	0.022816	0.022816	17.113	0.0008	*
P x p	1	0.742017	0.742017	556.512	0.0000	**
P x H	1	0.680067	0.680067	510.050	0.0000	**
p x H	1	0.0006	0.0006	0.450	0.5119	NS
P x p x H	1	1.06682	1.06682	800.112	0.0000	**
Error	16	0.021333	0.001333			
Total	23	2.70678				

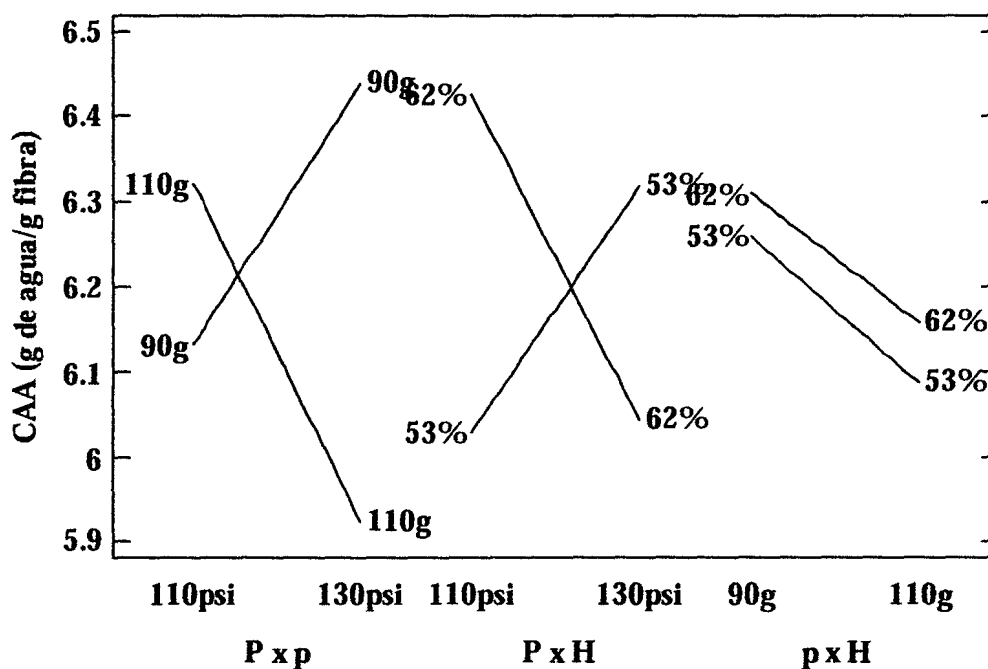
$R^2 = 99.21\%$ ;  $R^2_{aj} = 98.87\%$ ;  $CV = 0.58\%$ .



#### 7.4. Gráfico de efectos principales



#### 7.5. Gráfico de interacción de factores



## ANEXO 8

**RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA CAPACIDAD DE  
RETENCIÓN DE AGUA EN LA FIBRA OBTENIDA CON EXPANSIÓN POR  
EXPLOSIÓN**

**8.1. Tabla de análisis de varianza para comparación de tratamientos**

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fo	P-valor	Sig
Entre grupos	7	1.6287	0.2326	133.594	0.0000	*
Intra grupos	16	0.0278	0.0017			
Total	23	1.6566				

GL: grados de libertad; SC: Suma de cuadrados; CM: cuadrados medios; Fo: valor calculado de F; P-valor: Valor de P obtenido en software estadístico; NS: No significativo; \*Significativo; \*\*Altamente significativo.

**8.2. Tabla de la prueba de comparación múltiple de Tukey**

Tratamiento	n	Subconjunto para alfa = 0.05				
		1	2	3	4	5
1	3	7.0000				
8	3	7.0533				
3	3		7.2400			
4	3		7.3167			
2	3			7.4700		
6	3			7.5767	7.5767	
5	3				7.6833	7.6833
7	3					7.7400
Sig		0.763	0.375	0.092	0.092	0.709

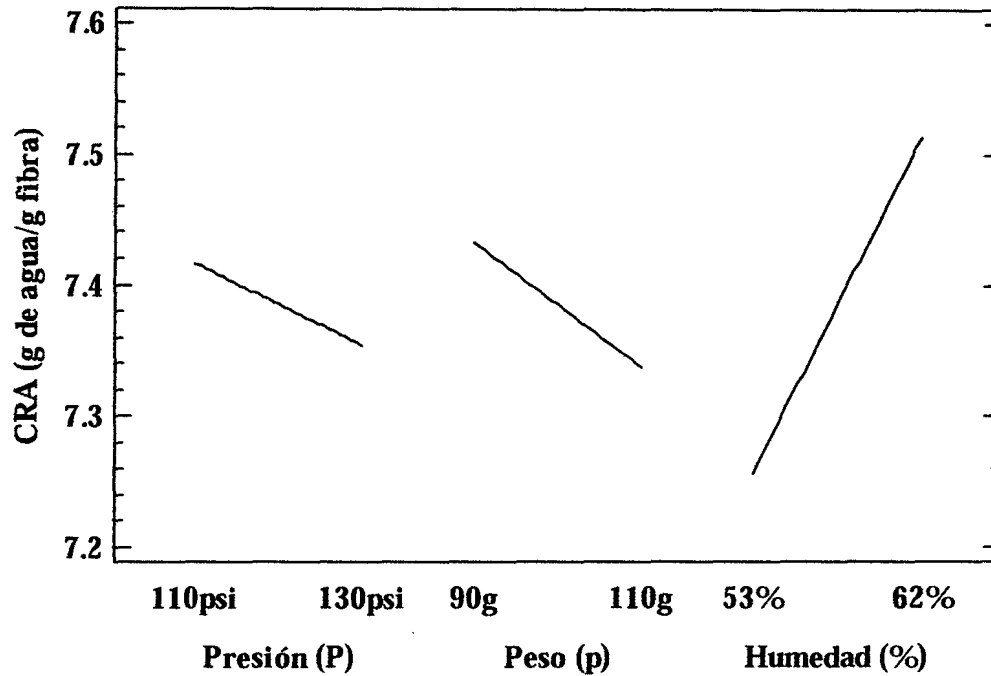
**8.3. Tabla de análisis de varianza multifactorial**

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fo	P-valor	Sig
P: Presión en expansor	1	0.022816	0.022816	13.100	0.0023	*
p: Peso de fibra	1	0.05415	0.05415	31.091	0.0000	*
H: Humedad de fibra	1	0.395267	0.395267	226.947	0.0000	*
P x p	1	0.355267	0.355267	203.981	0.0000	*
P x H	1	0.67335	0.67335	386.612	0.0000	*
p x H	1	0.114817	0.114817	65.923	0.0000	*
P x p x H	1	0.013066	0.013066	7.502	0.0146	*
Error	16	0.027866	0.001741			
Total	23	1.6566				

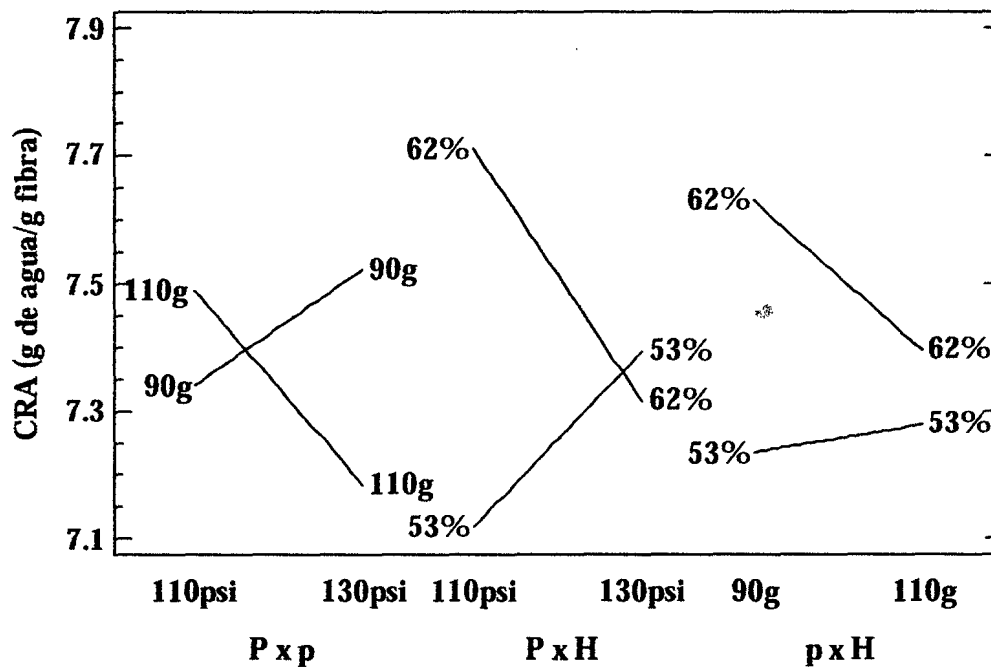
$R^2 = 98.32\%$ ;  $R^2_{aj} = 97.58\%$ ;  $CV = 0.56\%$ .



#### 8.4. Gráfico de efectos principales



#### 8.5. Gráfico de interacción de factores



## ANEXO 9

**RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA CAPACIDAD DE  
HINCHAMIENTO EN LA FIBRA OBTENIDA CON EXPANSIÓN POR  
EXPLOSIÓN**

**9.1. Tabla de análisis de varianza para comparación de tratamientos**

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fo	P-valor	Sig
Entre grupos	7	2.9368	0.4195	977.574	0.0000	**
Intra grupos	16	0.0068	0.0004			
Total	23	2.9443				

GL: grados de libertad; SC: Suma de cuadrados; CM: cuadrados medios; Fo: valor calculado de F; P-valor: Valor de P obtenido en software estadístico; NS: No significativo; \*Significativo; \*\*Altamente significativo.

**9.2. Tabla de la prueba de comparación múltiple de Tukey**

Tratamiento	n	Subconjunto para alfa = 0.05				
		1	2	3	4	5
1	3	5.7367				
4	3		5.9433			
3	3		5.9800			
5	3			6.2400		
2	3				6.4733	
6	3				6.4800	
7	3					6.7267
8	3					6.7300
Sig		1.000	0.417	1.000	1.000	1.000

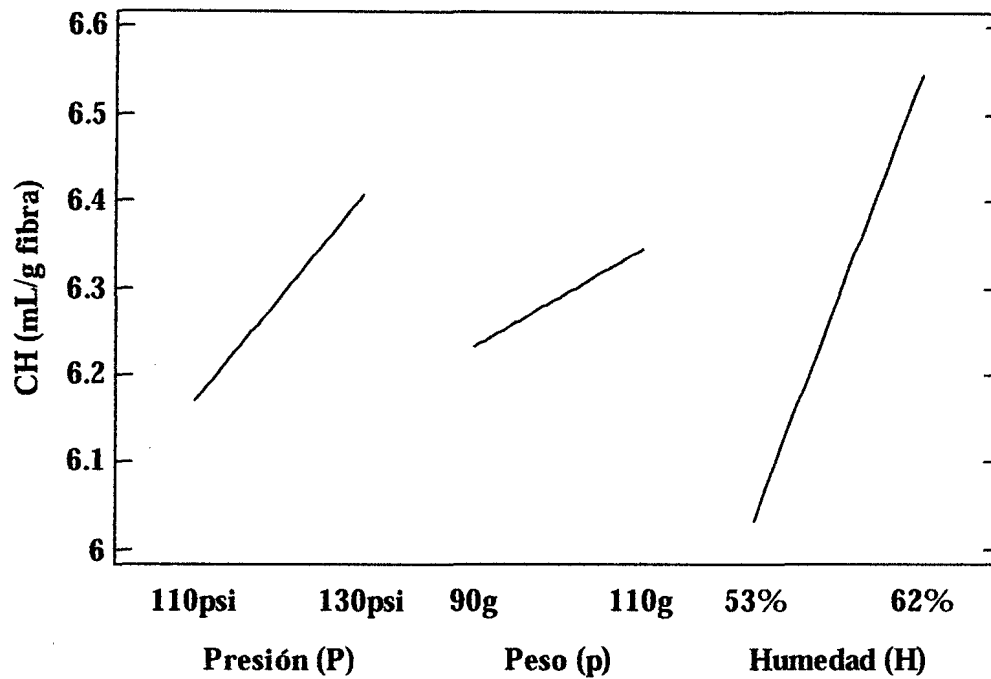
**9.3. Tabla de análisis de varianza multifactorial**

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fo	P-valor	Sig
P: Presión en expansor	1	0.333704	0.333704	777.563	0.0000	*
p: Peso de fibra	1	0.075937	0.075937	176.942	0.0000	*
H: Humedad de fibra	1	1.5657	1.5657	3648.243	0.0000	*
P x p	1	0.382538	0.382538	891.350	0.0000	*
P x H	1	0.078204	0.078204	182.223	0.0000	*
p x H	1	0.392704	0.392704	915.039	0.0000	*
P x p x H	1	0.108004	0.108004	251.660	0.0000	*
Error	16	0.006866	0.000429			
Total	23	2.94366				

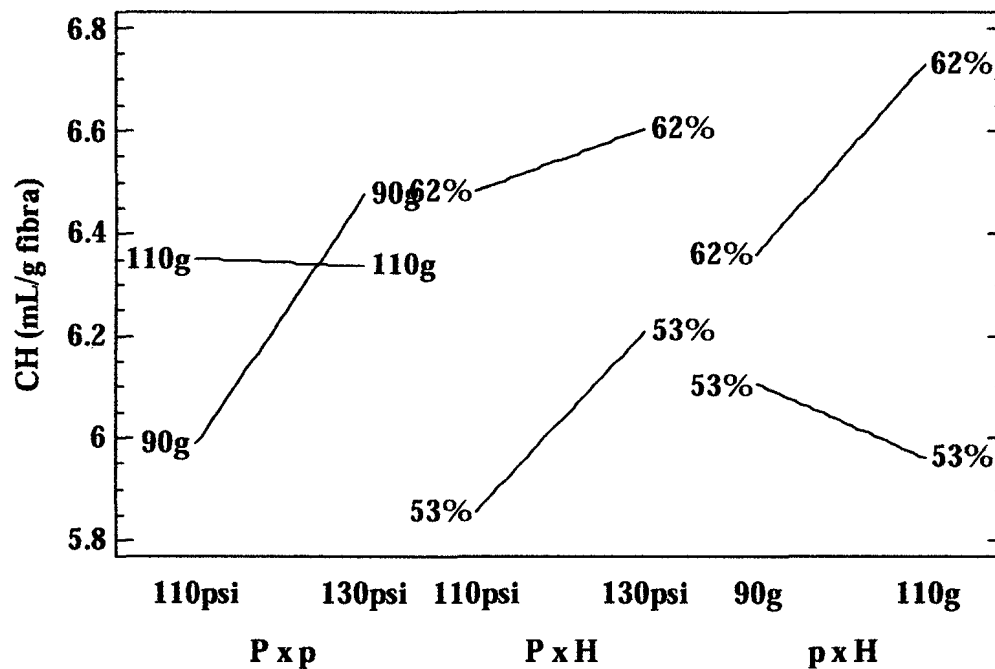
$R^2 = 99.77\%$ ;  $R^2_{aj} = 99.66\%$ ;  $CV = 0.32\%$ .



#### 9.4. Gráfico de efectos principales



#### 9.5. Gráfico de interacción de factores



## ANEXO 10

**RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA CAPACIDAD DE  
ABSORCIÓN DE GRASA EN LA FIBRA OBTENIDA CON EXPANSIÓN POR  
EXPLOSIÓN**

**10.1. Tabla de análisis de varianza para comparación de tratamientos**

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fo	P-valor	Sig
Entre grupos	7	0.9772	0.1396	51.869	0.000	*
Intra grupos	16	0.0430	0.0026			
Total	23	1.02036				

GL: grados de libertad; SC: Suma de cuadrados; CM: cuadrados medios; Fo: valor calculado de F; P-valor: Valor de P obtenido en software estadístico; NS: No significativo; \*Significativo; \*\*Altamente significativo.

**10.2. Tabla de la prueba de comparación múltiple de Tukey**

Tratamiento	n	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
4	3	3.4867			
2	3		3.7100		
5	3		3.7967	3.7967	
3	3			3.8700	
8	3			3.8900	
1	3				4.0133
6	3				4.0533
7	3				4.1600
Sig		1.000	0.484	0.399	0.176

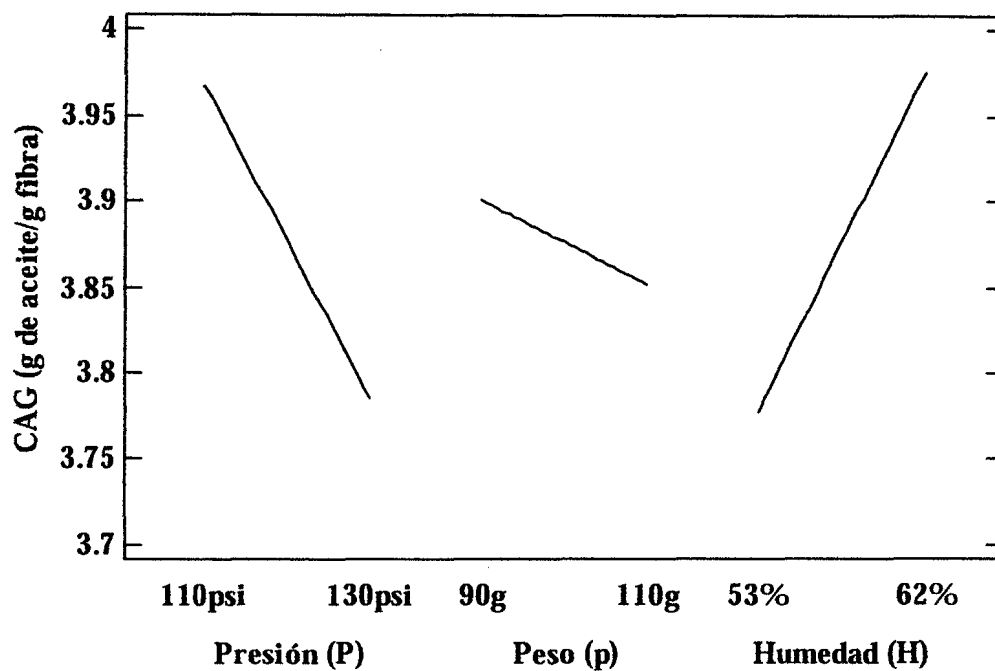
**10.3. Tabla de análisis de varianza multifactorial**

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fo	P-valor	Sig
P: Presión en expansor	1	0.199838	0.199838	74.243	0.0000	**
p: Peso de fibra	1	0.014504	0.014504	5.389	0.0338	*
H: Humedad de fibra	1	0.234037	0.234037	86.949	0.0000	**
P x p	1	0.124704	0.124704	46.330	0.0000	*
P x H	1	0.185504	0.185504	68.918	0.0000	*
p x H	1	0.133504	0.133504	49.599	0.0000	*
P x p x H	1	0.085204	0.085204	31.655	0.0000	*
Error	16	0.043066	0.002691			
Total	23	1.02036				

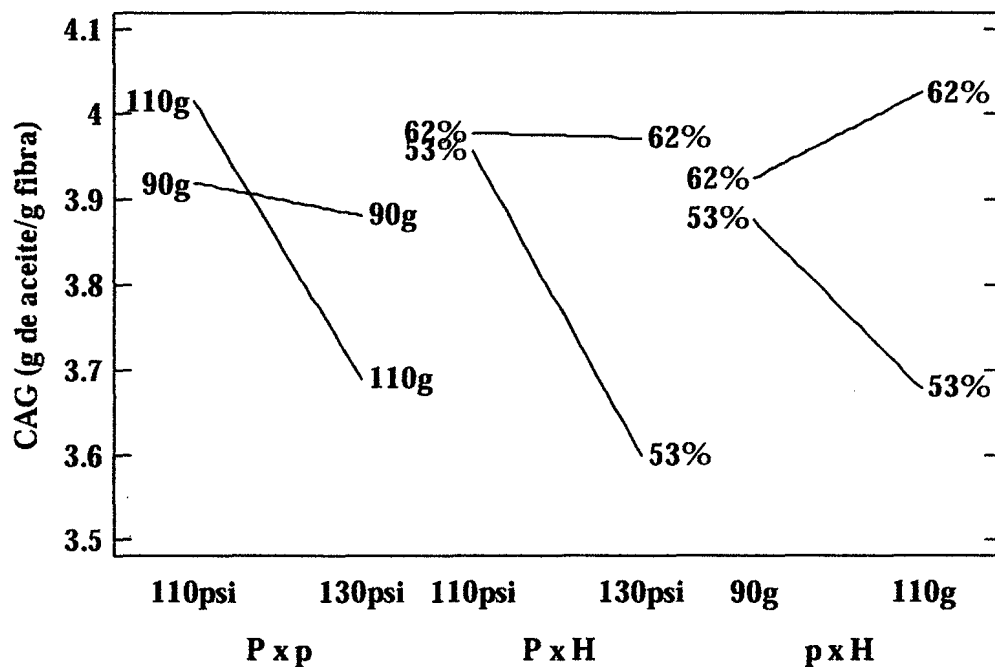
$R^2 = 95.78\%$ ;  $R^2_{aj} = 93.93\%$ ;  $CV = 1.32\%$ .



#### 10.4. Gráfico de efectos principales



#### 10.5. Gráfico de interacción de factores



## ANEXO 11

**RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CONTENIDO DE FIBRA  
DETERGENTE NEUTRO OBTENIDA CON EXPANSIÓN POR EXPLOSIÓN**

**11.1. Tabla de análisis de varianza para comparación de tratamientos**

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fo	P-valor	Sig
Entre grupos	7	53.2066	7.60094	30.462	0.000	*
Intra grupos	16	3.99233	0.24952			
Total	23	57.1989				

GL: grados de libertad; SC: Suma de cuadrados; CM: cuadrados medios; Fo: valor calculado de F; P-valor: Valor de P obtenido en software estadístico; NS: No significativo; \*Significativo; \*\*Altamente significativo.

**11.2. Tabla de la prueba de comparación múltiple de Tukey**

Tratamiento	n	Subconjunto para alfa = 0.05				
		1	2	3	4	5
4	3	53.2200				
2	3		54.7667			
3	3		54.8367			
6	3		55.1833	55.1833		
7	3		55.4300	55.4300	55.4300	
5	3			56.2833	56.2833	
8	3				56.6333	
1	3					58.6100
Sig		1.000	0.729	0.193	0.126	1.000

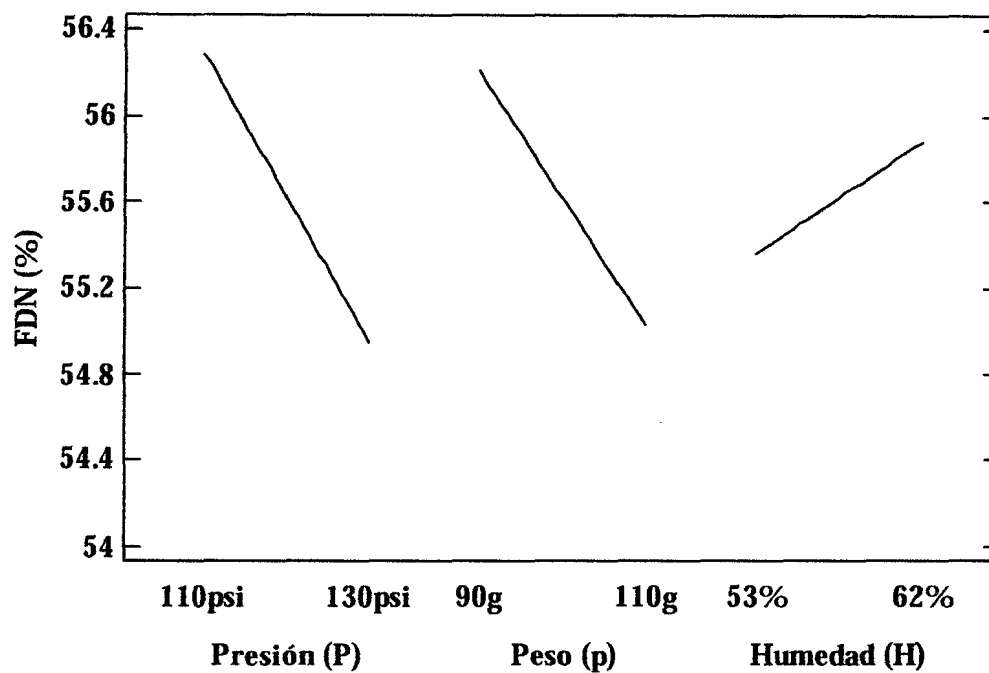
**11.3. Tabla de análisis de varianza multifactorial**

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fo	P-valor	Sig
P: Presión en expansor	1	10.7602	10.7602	43.123	0.0000	*
p: Peso de fibra	1	8.3662	8.3662	33.529	0.0000	*
H: Humedad de fibra	1	1.6485	1.6485	6.607	0.0205	*
P x p	1	7.69534	7.69534	30.840	0.0000	*
P x H	1	11.6065	11.6065	46.515	0.0000	*
p x H	1	13.1276	13.1276	52.611	0.0000	*
P x p x H	1	0.002204	0.002204	0.01	0.9263	NS
Error	16	3.99233	0.249521			
Total	23	57.1989				

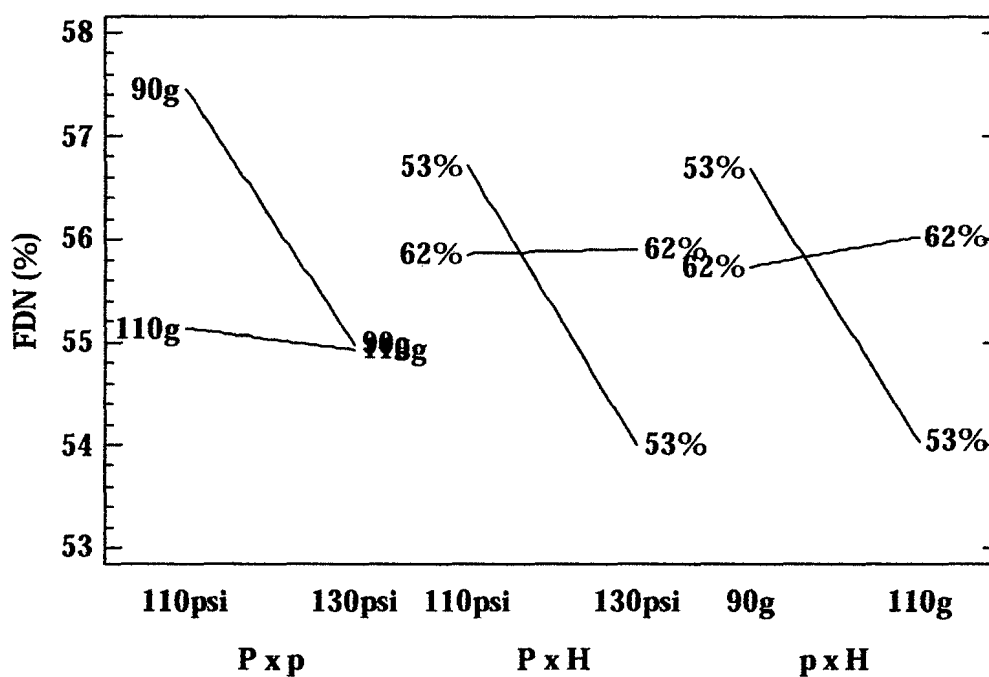
$R^2 = 93.02\%$ ;  $R^2_{aj} = 89.97\%$ ;  $CV = 0.90\%$ .



#### 11.4. Gráfico de efectos principales



#### 11.5. Gráfico de interacción de factores



## ANEXO 12

**RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA COMPARACIÓN DEL  
TRATAMIENTO SELECCIONADO DEL PROCESO HIDROTÉRMICO Y  
EXPANSIÓN POR EXPLOSIÓN**

**12.1. Datos estadísticos de capacidad de absorción de agua**

Métodos de obtención de fibra	n	Media	Desviación típica	Error típ. de la media
Proceso hidrotérmico	3	7.3233	0.03512	0.02028
Expansión por explosión	3	6.7367	0.04726	0.02728

**12.2. Prueba de t student de capacidad de absorción de agua**

	Prueba de levene para la igualdad de varianzas		Prueba de t de student		
	F	P-valor	t	gl	P-valor
Se han asumido varianzas iguales	0.549	0.500	17.258	4	0.000
No se han asumido varianzas iguales			17.258	3.693	0.000

**12.3. Datos estadísticos de capacidad de retención de agua**

Métodos de obtención de fibra	n	Media	Desviación típica	Error típ. de la media
Proceso hidrotérmico	3	9.6500	0.05000	0.02887
Expansión por explosión	3	7.7400	0.02000	0.01155

**12.4. Prueba de t student de capacidad de retención de agua**

	Prueba de levene para la igualdad de varianzas		Prueba de t de student		
	F	P-valor	t	gl	P-valor
Se han asumido varianzas iguales	1.241	0.328	61.432	4	0.000
No se han asumido varianzas iguales			61.432	2.624	0.000

**12.5. Datos estadísticos de capacidad de hinchamiento**

Métodos de obtención de fibra	n	Media	Desviación típica	Error típ. de la media
Proceso hidrotérmico	3	9.9400	0.05292	0.03055
Expansión por explosión	3	6.7267	0.00577	0.00333

### 12.6. Prueba de t student de capacidad de hinchamiento

	Prueba de levene para la igualdad de varianzas		Prueba de t de student		
	F	P-valor	t	gl	P-valor
Se han asumido varianzas iguales	9.394	0.037	104.560	4	0.000
No se han asumido varianzas iguales			104.560	2.048	0.000

### 12.7. Datos estadísticos de capacidad de absorción de grasa

Métodos de obtención de fibra	n	Media	Desviación típica	Error típ. de la media
Proceso hidrotérmico	3	4.0167	0.01528	0.00882
Expansión por explosión	3	4.1600	0.02646	0.01528

### 12.8. Prueba de t student de capacidad de absorción de grasa

	Prueba de levene para la igualdad de varianzas		Prueba de t de student		
	F	P-valor	t	gl	P-valor
Se han asumido varianzas iguales	1.600	0.275	8.126	4	0.001
No se han asumido varianzas iguales			8.126	3.200	0.003

### 12.9. Datos estadísticos del contenido de fibra detergente neutro

Métodos de obtención de fibra	n	Media	Desviación típica	Error típ. de la media
Proceso hidrotérmico	3	71.210	3.72000	2.14774
Expansión por explosión	3	55.430	0.77311	0.44636

### 12.10. Prueba de t student de fibra detergente neutro

	Prueba de levene para la igualdad de varianzas		Prueba de t de student		
	F	P-valor	t	gl	P-valor
Se han asumido varianzas iguales	2.291	0.205	7.194	4	0.002
No se han asumido varianzas iguales			7.194	2.172	0.015

## ANEXO 13

### METODOLOGÍA PARA DETERMINACIÓN DE HUMEDAD

**Método** : Gravimétrico.

**Fundamento** : Pérdida de peso de la muestra por calentamiento en estufa a 100 °C hasta peso constante.

#### Equipos y materiales de laboratorio

- Balanza analítica, con resolución de.
- Estufa con regulador de temperatura a 100 °C ± 2 °C.
- Placas de base plana de diámetro ≥ 5 cm, con tapa.
- Desecador de vidrio con agente desecante.
- Espátula.
- Pinzas metálicas.

#### Procedimiento

Precalear la estufa a 100 °C ± 2 °C, luego secar las placas en la estufa durante 1 hora, enfriar en desecador y pesar. Colocar en la placa de 2.5 a 3 g de muestra preparada. Secar por 5 horas en estufa a 100 °C ± 2 °C. Enfriar en desecador y pesar rápidamente.

#### Cálculo

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{Peso de placa + muestra (g)} - \text{Peso de placa + muestra seca (g)}}{\text{Peso de muestra (g)}} \times 100$$



## ANEXO 14

**RESULTADOS DEL CONTENIDO DE FIBRA DETERGENTE NEUTRO, FIBRA DETERGENTE ÁCIDA Y LIGNINA DETERGENTE ÁCIDA OBTENIDAS MEDIANTE PROCESO HIDROTÉRMICO**

Trata- miento	Parámetros de estudio			FDN (%)	FDA (%)	LDA (%)
	T (°C)	t (minuto)	R (g-mL)			
Control				58.6687	54.8276	1.4311
Control				57.2556	54.8934	1.3871
Control				58.0412	54.6055	1.0115
1	80	10	1:1	49.0551	48.3426	3.9596
1	80	10	1:1	49.7595	48.8839	3.5577
1	80	10	1:1	49.4300	48.7058	3.4087
2	90	10	1:1	66.5552	48.3784	4.0149
2	90	10	1:1	65.1959	49.5094	4.1231
2	90	10	1:1	67.1581	51.5520	4.2421
3	80	15	1:1	60.1208	50.4815	1.3125
3	80	15	1:1	57.0412	52.4621	2.4903
3	80	15	1:1	58.8040	51.3883	3.0697
4	90	15	1:1	70.6788	53.7285	1.9234
4	90	15	1:1	71.0158	51.0300	2.7928
4	90	15	1:1	70.6403	52.1831	3.2924
5	80	10	1:2	52.8686	50.7540	4.7194
5	80	10	1:2	53.2260	49.4298	4.1076
5	80	10	1:2	52.6869	49.5749	4.3798
6	90	10	1:2	67.7401	51.8948	2.6546
6	90	10	1:2	68.1796	53.5232	2.2502
6	90	10	1:2	67.5761	52.0099	2.2378
7	80	15	1:2	53.0275	52.9368	5.0259
7	80	15	1:2	55.8138	54.7119	5.9508
7	80	15	1:2	54.8853	53.8060	6.6463
8	90	15	1:2	67.4915	50.3178	3.8404
8	90	15	1:2	71.2097	48.3040	3.5733
8	90	15	1:2	74.9294	51.9041	3.2501

## ANEXO 15

**RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DE LAS FIBRAS  
OBTENIDAS MEDIANTE PROCESO HIDROTÉRMICO**

Trata- miento	Parámetros de estudio			Propiedades funcionales			
	T (°C)	t (minuto)	R (g-mL)	CAA (g/g)	CRA (g/g)	CH (mL/g)	CAG (g/g)
Control				6.70	7.69	6.73	3.69
Control				6.75	7.57	6.73	3.66
Control				6.74	7.65	6.73	3.67
1	80	10	1:1	6.41	8.56	7.73	3.25
1	80	10	1:1	6.34	8.45	7.72	3.22
1	80	10	1:1	6.31	8.48	7.73	3.31
2	90	10	1:1	6.20	9.86	9.24	3.22
2	90	10	1:1	6.19	9.81	9.28	3.28
2	90	10	1:1	6.12	9.76	9.22	3.24
3	80	15	1:1	6.51	9.02	7.25	3.22
3	80	15	1:1	6.47	8.98	7.24	3.27
3	80	15	1:1	6.49	8.90	7.23	3.25
4	90	15	1:1	6.62	9.41	8.73	3.21
4	90	15	1:1	6.69	9.45	8.74	3.27
4	90	15	1:1	6.60	9.53	8.72	3.29
5	80	10	1:2	6.82	9.39	8.98	3.18
5	80	10	1:2	6.92	9.37	9.06	3.19
5	80	10	1:2	6.80	9.28	8.98	3.07
6	90	10	1:2	6.81	9.24	10.47	3.76
6	90	10	1:2	6.76	8.16	10.49	3.75
6	90	10	1:2	6.70	9.12	10.46	3.70
7	80	15	1:2	6.94	9.63	9.21	3.28
7	80	15	1:2	6.89	9.78	9.24	3.29
7	80	15	1:2	6.93	9.73	9.23	3.32
8	90	15	1:2	7.29	9.70	9.88	4.00
8	90	15	1:2	7.36	9.60	9.98	4.02
8	90	15	1:2	7.32	9.65	9.96	4.03

## ANEXO 16

**RESULTADOS DEL CONTENIDO DE FIBRA DETERGENTE NEUTRO, FIBRA DETERGENTE ÁCIDA Y LIGNINA DETERGENTE ÁCIDA OBTENIDAS MEDIANTE EXPANSIÓN POR EXPLOSIÓN**

Trata- miento	Parámetros de estudio			FDN (%)	FDA (%)	LDA (%)
	P (lbf/plg <sup>2</sup> )	p (g)	H (%)			
Control				58.6687	54.8276	1.4311
Control				57.2556	54.8934	1.3871
Control				58.0412	54.6055	1.0115
1	110	90	53	58.9871	55.3705	19.4325
1	110	90	53	58.8083	55.8248	17.9456
1	110	90	53	58.0295	54.1797	17.8471
2	130	90	53	54.0518	52.1831	2.9689
2	130	90	53	54.5774	53.0960	2.1607
2	130	90	53	55.6678	54.2610	1.6248
3	110	110	53	55.1010	53.3754	9.4829
3	110	110	53	54.6618	52.7115	8.1709
3	110	110	53	54.7476	52.8499	9.6594
4	130	110	53	53.1865	52.0958	1.3132
4	130	110	53	53.1735	52.1278	1.1859
4	130	110	53	53.2951	52.1265	1.1959
5	110	90	62	56.0124	55.5560	16.7776
5	110	90	62	56.0105	55.1752	18.6296
5	110	90	62	56.8333	56.0538	17.0954
6	130	90	62	55.1299	54.3933	2.1533
6	130	90	62	55.2363	55.1012	2.0932
6	130	90	62	55.1812	54.4167	2.1759
7	110	110	62	55.9954	55.3103	13.1414
7	110	110	62	55.7438	55.2450	12.0994
7	110	110	62	54.5478	54.2269	13.1641
8	130	110	62	57.0967	53.3355	8.7610
8	130	110	62	56.3196	52.6748	8.1895
8	130	110	62	56.4786	53.5358	8.3132

## ANEXO 17

**RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DE LAS FIBRAS  
OBTENIDAS MEDIANTE EXPANSIÓN POR EXPLOSIÓN**

Trata- miento	Parámetros de estudio			Propiedades funcionales			
	P (lbf/plg <sup>2</sup> )	p (g)	H (%)	CAA (g/g)	CRA (g/g)	CH (mL/g)	CAG (g/g)
Control				6.70	7.69	6.73	3.69
Control				6.75	7.57	6.73	3.66
Control				6.74	7.65	6.73	3.67
1	110	90	53	6.18	6.93	5.74	4.08
1	110	90	53	6.13	7.09	5.74	4.03
1	110	90	53	6.14	6.98	5.73	4.02
2	130	90	53	6.37	7.43	6.47	3.78
2	130	90	53	6.32	7.50	6.48	3.71
2	130	90	53	6.42	7.48	6.47	3.64
3	110	110	53	5.90	7.29	5.98	3.87
3	110	110	53	5.93	7.21	5.98	3.85
3	110	110	53	5.89	7.22	5.98	3.89
4	130	110	53	6.23	7.31	5.88	3.50
4	130	110	53	6.27	7.35	5.98	3.48
4	130	110	53	6.30	7.29	5.97	3.48
5	110	90	62	6.12	7.67	6.23	3.76
5	110	90	62	6.11	7.70	6.25	3.74
5	110	90	62	6.12	7.68	6.24	3.89
6	130	90	62	6.50	7.60	6.47	4.08
6	130	90	62	6.49	7.59	6.49	4.01
6	130	90	62	6.53	7.54	6.48	4.07
7	110	110	62	6.70	7.76	6.73	4.19
7	110	110	62	6.79	7.74	6.72	4.14
7	110	110	62	6.72	7.72	6.73	4.15
8	130	110	62	5.59	7.01	6.74	3.83
8	130	110	62	5.52	7.08	6.72	3.86
8	130	110	62	5.63	7.07	6.73	3.98

## ANEXO 18

**ESQUEMA DEL DISEÑO FACTORIAL 2<sup>3</sup> PARA OBTENCIÓN DE FIBRA  
MEDIANTE PROCESO HIDROTÉRMICO**

Trata- miento	Factores de estudio			Número de repeticiones	Simbología
	Temperatura de agua (°C)	Tiempo de inmersión (minuto)	Relación materia prima: agua (g-mL)		
1	80	10	1:1	1 2 3	T1
2	90	10	1:1	1 2 3	T2
3	80	15	1:1	1 2 3	T3
4	90	15	1:1	1 2 3	T4
5	80	10	1:2	1 2 3	T5
6	90	10	1:2	1 2 3	T6
7	80	15	1:2	1 2 3	T7
8	90	15	1:2	1 2 3	T8

## ANEXO 19

**ESQUEMA DEL DISEÑO FACTORIAL 2<sup>3</sup> PARA OBTENCIÓN DE FIBRA CON  
EXPANSIÓN POR EXPLOSIÓN**

Trata- miento	Factores de estudio			Número de repeticiones	Simbología
	Presión en expansor (lbf/plg <sup>2</sup> )	Humedad de fibra (%)	Peso de fibra (g)		
1	110	53	90	1 2 3	T1
2	130	53	90	1 2 3	T2
3	110	62	90	1 2 3	T3
4	130	62	90	1 2 3	T4
5	110	53	110	1 2 3	T5
6	130	53	110	1 2 3	T6
7	110	62	110	1 2 3	T7
8	130	62	110	1 2 3	T8

## ANEXO 20

**RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA COMPARACIÓN DEL  
TRATAMIENTO SELECCIONADO DEL PROCESO HIDROTÉRMICO Y  
EXPANSIÓN POR EXPLOSIÓN CON FIBRA SIN TRATAR**

**20.1. Prueba de t de Dunnett de capacidad de absorción de agua**

Métodos de obtención de fibra	Control	Diferencia de medias	Error típico	P-valor
Proceso hidrotérmico	Fibra sin tratar	0.59333 <sup>Q</sup>	0.03043	0.000
Expansión por explosión	Fibra sin tratar	0.00667	0.03043	0.579

Las pruebas t de Dunnett (> control) tratan un grupo como control y lo comparan con todos los demás.

<sup>Q</sup> La diferencia de medias es significativa al nivel 0.05.

**20.2. Prueba de t de Dunnett de capacidad de retención de agua**

Métodos de obtención de fibra	Control	Diferencia de medias	Error típico	P-valor
Proceso hidrotérmico	Fibra sin tratar	2.01333 <sup>Q</sup>	0.03839	0.000
Expansión por explosión	Fibra sin tratar	0.10333 <sup>Q</sup>	0.03839	0.031

**20.3. Prueba de t de Dunnett de capacidad de hinchamiento**

Métodos de obtención de fibra	Control	Diferencia de medias	Error típico	P-valor
Proceso hidrotérmico	Fibra sin tratar	3.21000 <sup>Q</sup>	0.02509	0.000
Expansión por explosión	Fibra sin tratar	-0.00333	0.02509	0.716

**20.4. Prueba de t de Dunnett de capacidad de absorción de grasa**

Métodos de obtención de fibra	Control	Diferencia de medias	Error típico	P-valor
Proceso hidrotérmico	Fibra sin tratar	0.34333 <sup>Q</sup>	0.01610	0.000
Expansión por explosión	Fibra sin tratar	0.48667 <sup>Q</sup>	0.01610	0.000

**20.5. Prueba de t de Dunnett de fibra detergente neutro**

Métodos de obtención de fibra	Control	Diferencia de medias	Error típico	P-valor
Proceso hidrotérmico	Fibra sin tratar	13.22000 <sup>Q</sup>	1.82178	0.000
Expansión por explosión	Fibra sin tratar	-2.56000	1.82178	0.961



## ANEXO 21

## FOTOGRAFÍAS DEL DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN



Foto 1. Hojas del maguey troceados



Foto 2. Pelado de las hojas



Foto 3. Pesado de las hojas picadas

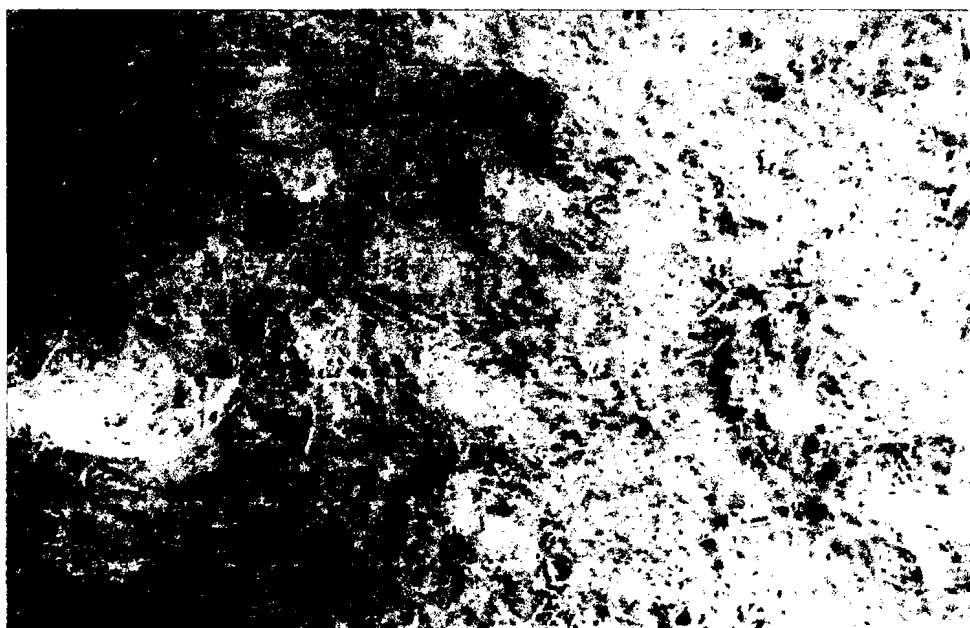


Foto 4. Fibra húmeda y prensada procedente del proceso hidrotérmico

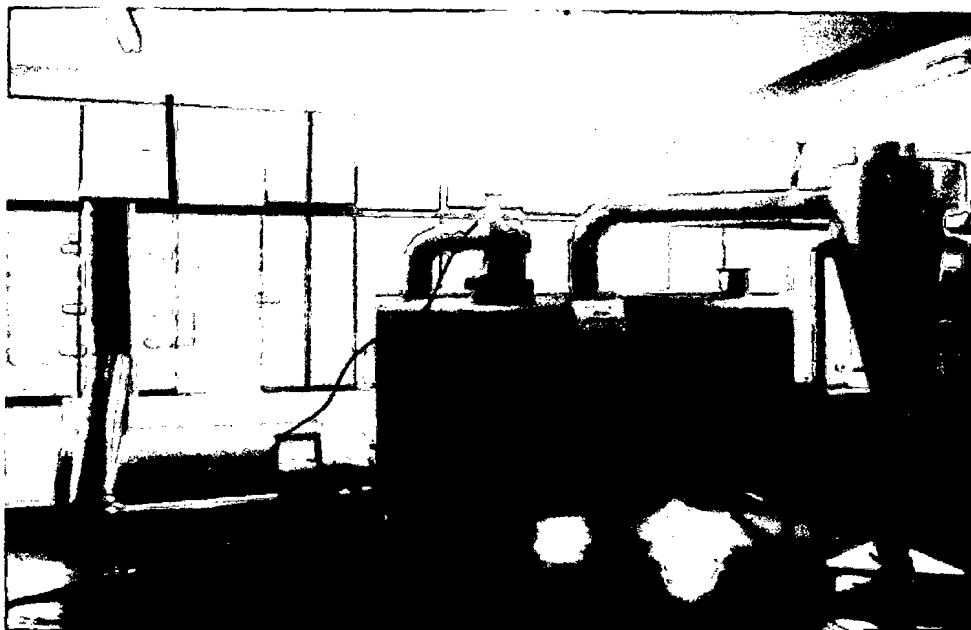


Foto 5. Secador lecho fluidizado utilizado en el secado de la fibra del maguey

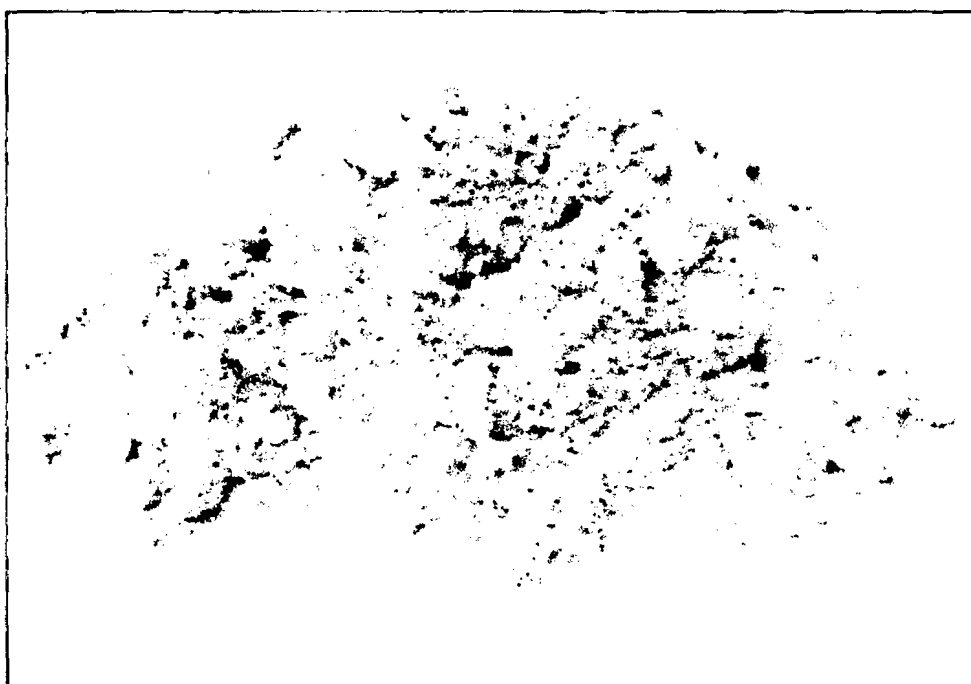


Foto 6. Fibra seca obtenida con proceso hidrotérmico

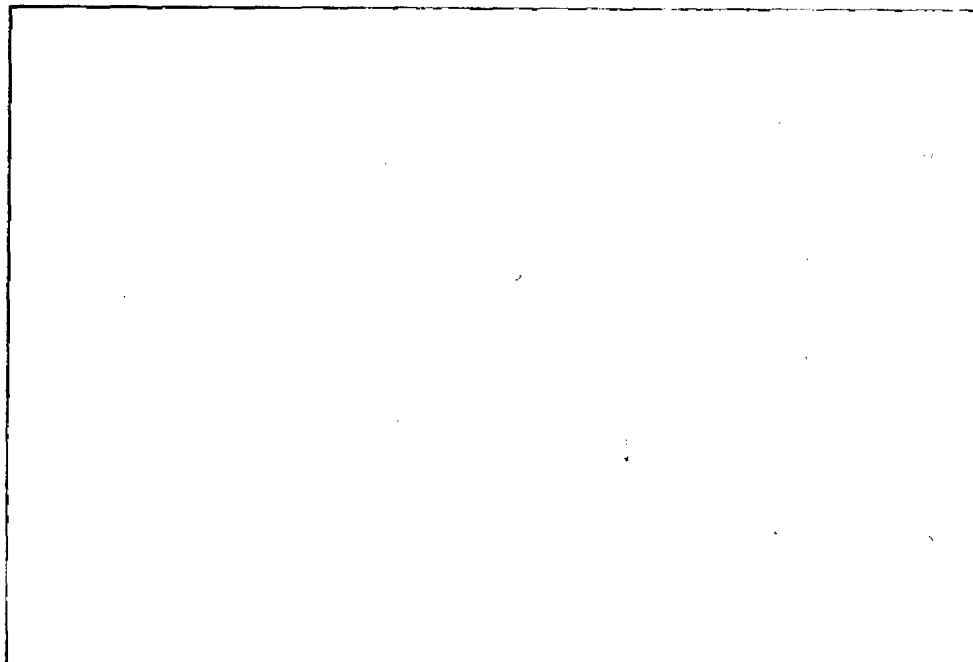


Foto 7. Fibra seca antes de someter a expansión por explosión

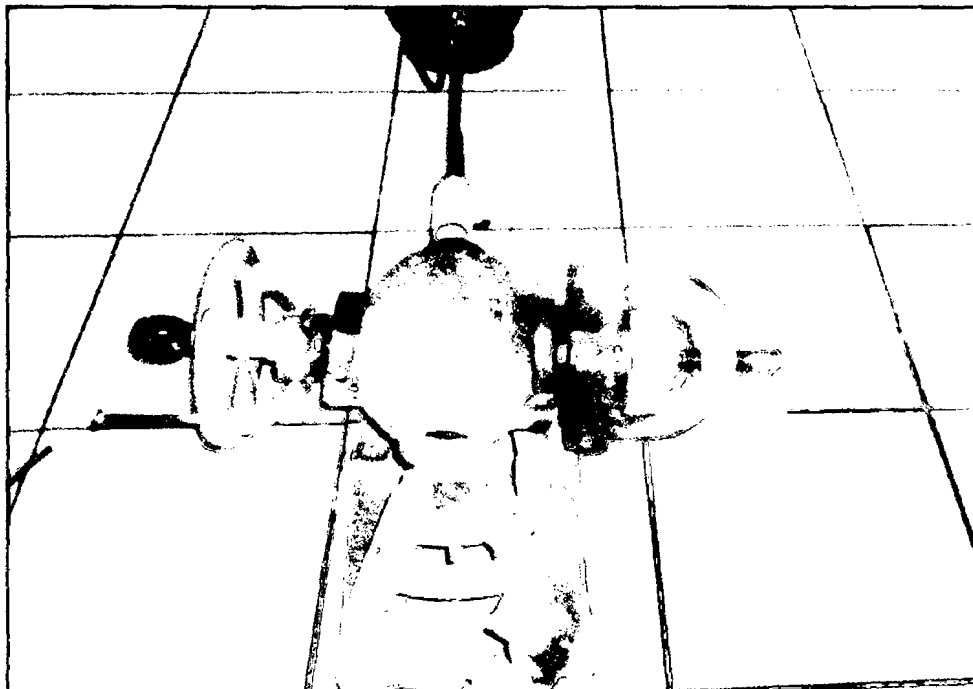


Foto 8. Equipo expansor tipo batch utilizado en la investigación

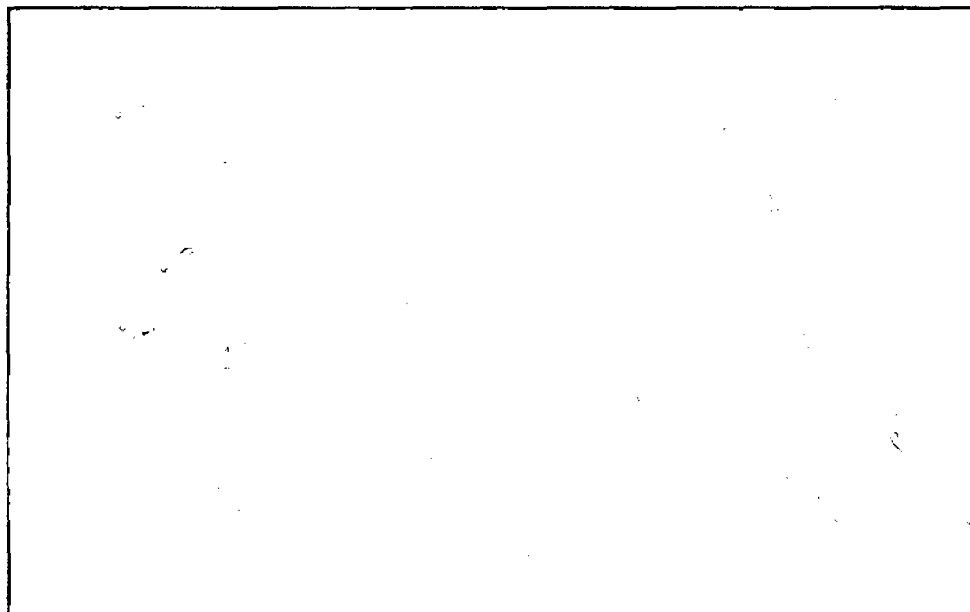


Foto 9. Fibra seca después de expansión por explosión

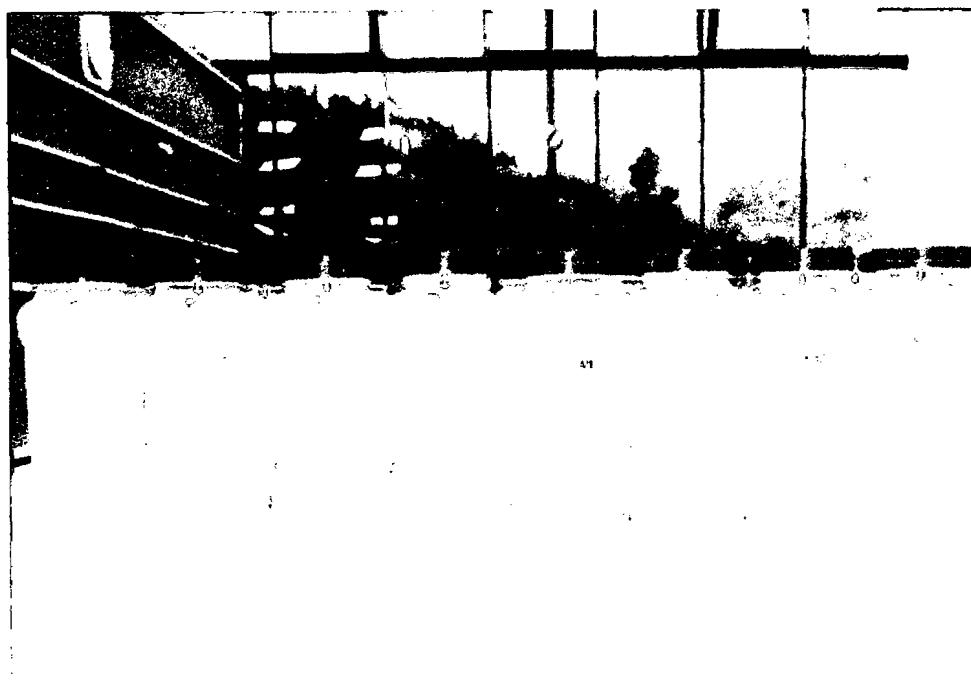


Foto 10. Fibra obtenida con proceso hidrotérmico



Foto 11. Fibra obtenida con expansión por explosión

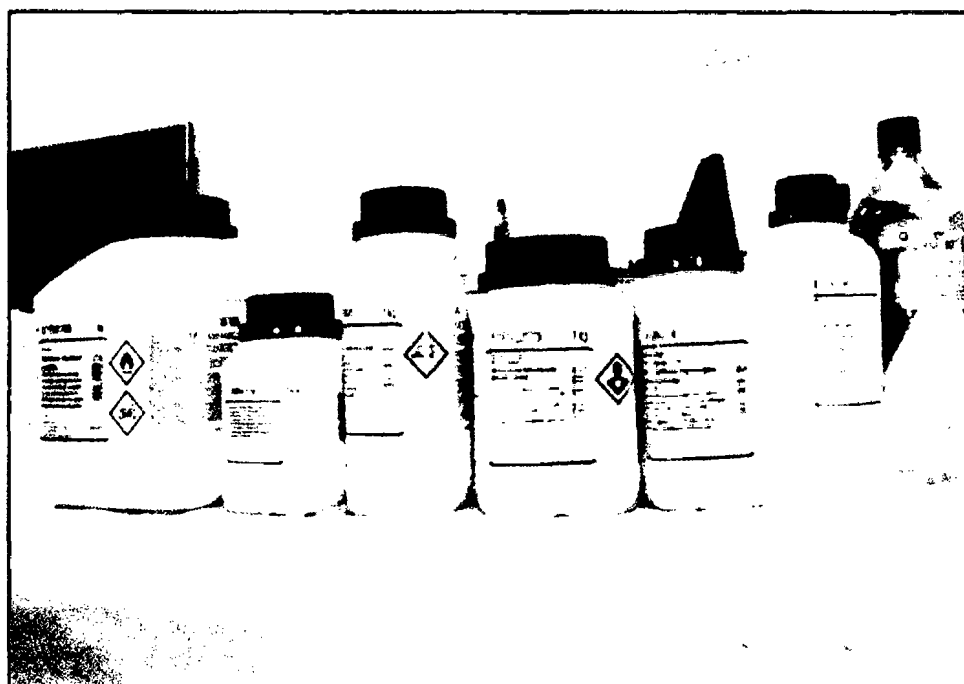


Foto 12. Reactivos usados para determinación de fibra detergente neutro y ácida



Foto 13. Digestión de fibras en solución detergente neutro

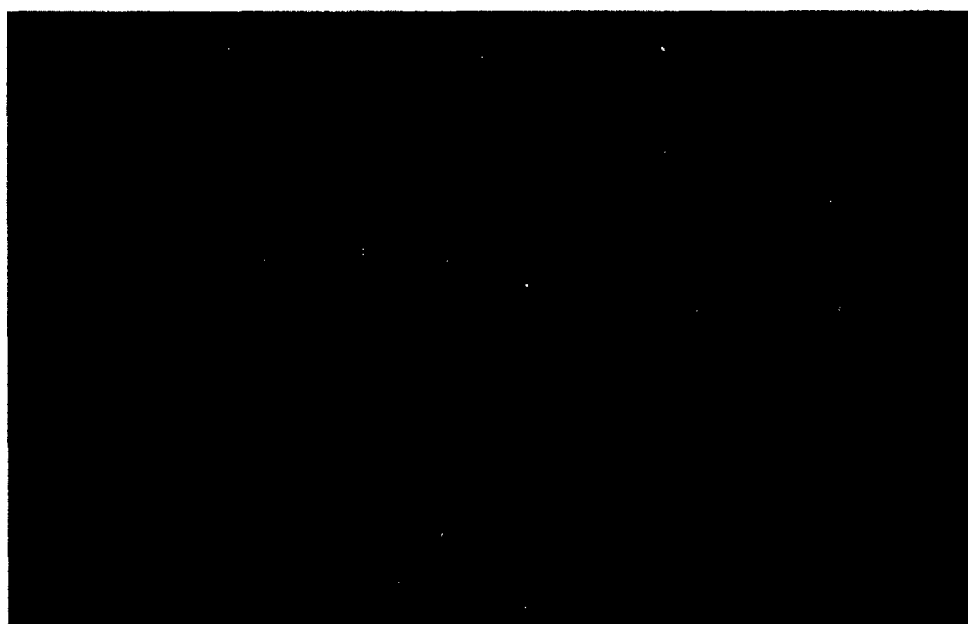


Foto 14. Muestras secas procedentes de lignina detergente ácida para incineración



Foto 15. Muestras en enfriamiento para determinación de lignina

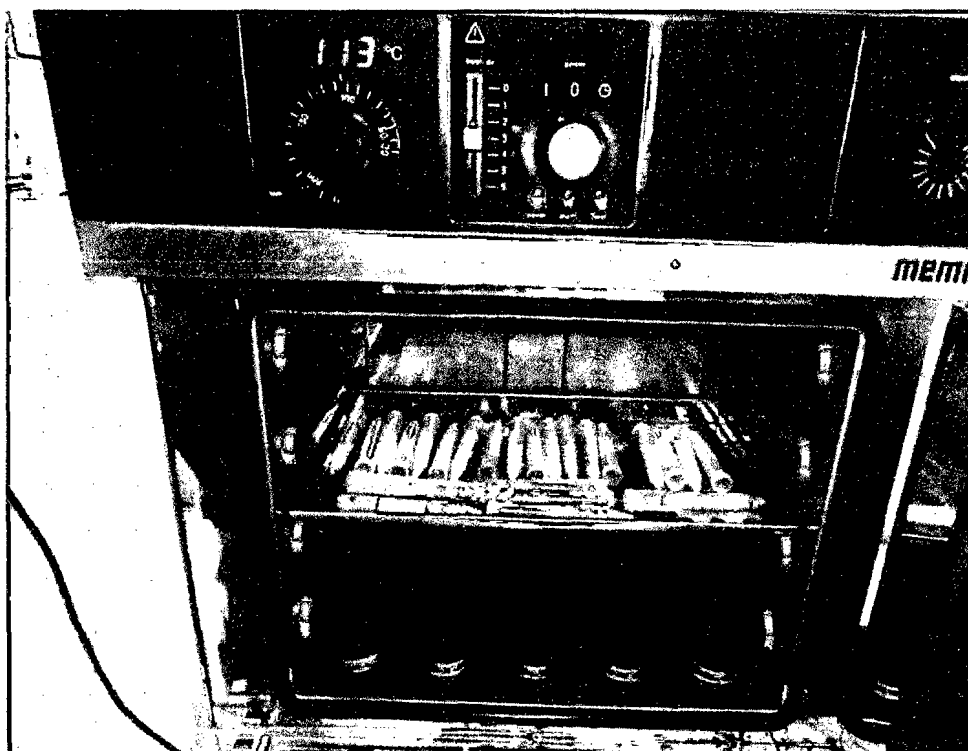


Foto 16. Secado de muestras para determinación de capacidad de retención de agua

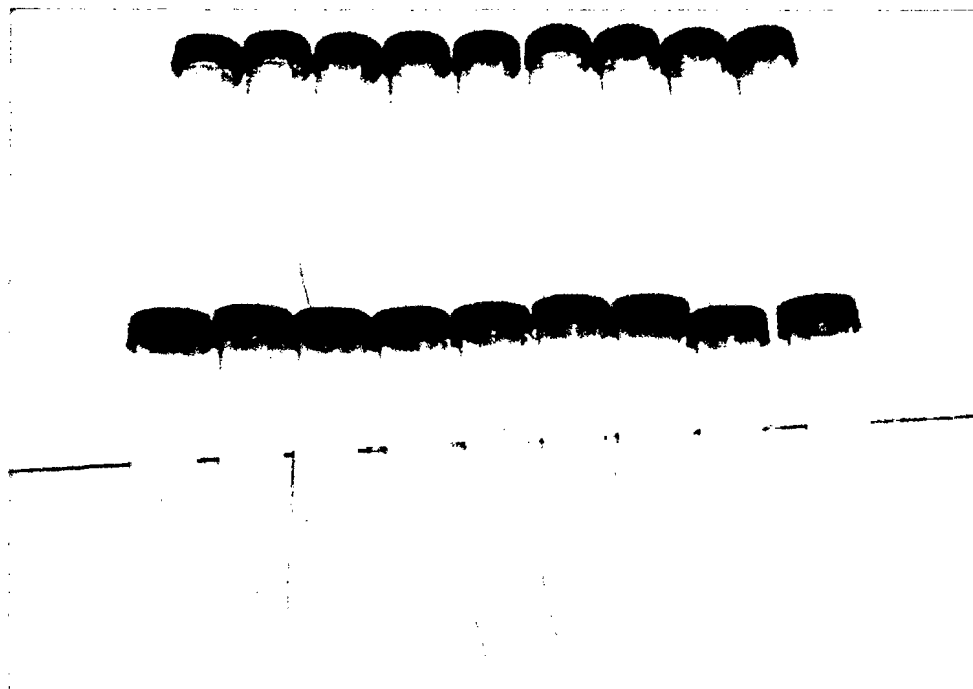


Foto 17. Sedimento seco de fibra en la determinación de la capacidad de retención de agua

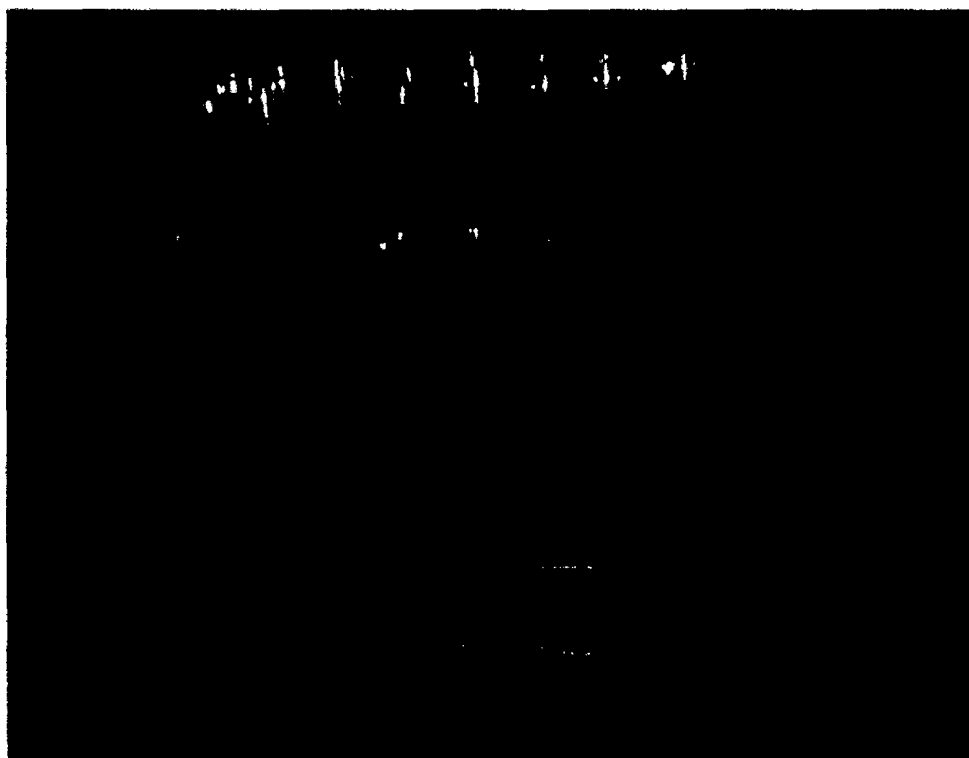


Foto 18. Determinación de la capacidad de hinchamiento



Foto 19. Sedimento de fibra en la determinación de capacidad de absorción de grasa