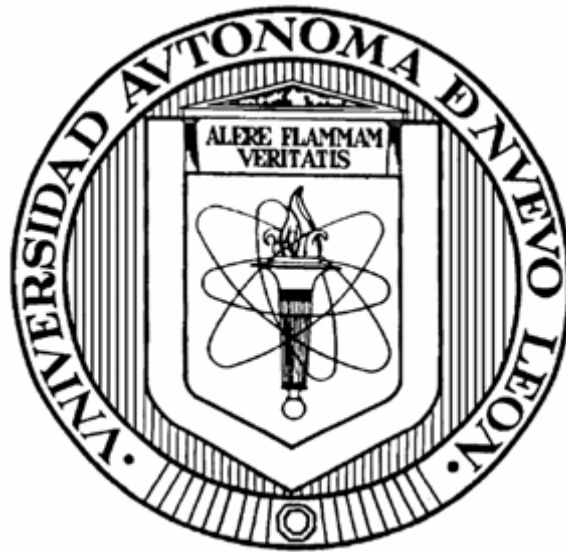


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



**“EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN FUNCIONAL DE LA FIBRA DE HOJAS
DEL *Agave tequilana* WEBER DESTINADOS PARA LA INCLUSIÓN EN
ALIMENTOS”**

Por

ING. FULGENCIO VILCANQUI PÉREZ

Como requisito parcial para obtener el Grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

con Acentuación en Alimentos

Junio, 2009

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



**EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN FUNCIONAL DE LA FIBRA DE
HOJAS DEL *Agave tequilana* WEBER DESTINADOS PARA LA
INCLUSIÓN EN ALIMENTOS**

Por

ING. FULGENCIO VILCANQUI PÉREZ

Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS
con Acentuación en Alimentos

Junio, 2009

**EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN FUNCIONAL DE LA FIBRA DE
HOJAS DEL *Agave tequilana* WEBER DESTINADOS PARA LA
INCLUSIÓN EN ALIMENTOS**

Comité de Tesis

M.C. Carlos Leonel García Díaz

Director

Dr. Roberto Mercado Hernández

Secretario

Dra. Ma. Guadalupe Alanís Guzmán

Vocal

**EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN FUNCIONAL DE LA FIBRA DE
HOJAS DEL *Agave tequilana* WEBER DESTINADOS PARA LA
INCLUSIÓN EN ALIMENTOS**

Comité Académico de Maestría

Subdirector de Estudios de Postgrado

Dedicatoria

Agradecimiento

Expreso mi sincero agradecimiento al M.C. Carlos Leonel García Díaz Asesor de mi Tesis. Así como a la Dra. Ma. Guadalupe Alanís Guzmán y al Dr. Roberto Mercado Hernández integrantes del comité de tesis, por sus valiosos aportes para la culminación del presente trabajo.

A los Profesores como el Dr. Carlos Amaya, Dr. Juan Gabriel Báez, Dr. Carlos Aguilera, Dr. Roque Gonzalo; por sus orientaciones y la motivación para la realización del presente trabajo, además de quienes pude aprender sus valiosas enseñanzas.

A Luz Elisa, Patricia, Cristina, Mayra, Arturo, Polo; responsables de la parte administrativa en el laboratorio de alimentos, quienes supieron compartir su amistad durante mi estadía en México, del que estaré muy reconocido por siempre.

A Nelly Gochicoa, Derek Tavares, Paulina Savage, Juliana Vanegas, funcionarios y asesores de la OEA.

A la Organización de los Estados Americanos (OEA), por la beca integral, además del financiamiento parcial para la realización del trabajo de investigación.

A la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac (UNAMBA), por darme la oportunidad de realizar mis estudios de postgrado.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, por acogerme por más de dos años y brindarme todas las facilidades en sus instalaciones.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Sección	Página
1. RESÚMEN Y ABSTRACT	1
2. INTRODUCCIÓN	5
3. HIPÓTESIS	6
4. OBJETIVOS	7
4.1 Objetivo General	7
4.2 Objetivos particulares	7
5. ANTECEDENTES	8
5.1 <i>Agave</i>	8
5.1.1 Generalidades del <i>Agave</i>	8
5.1.2 <i>Agave tequilana</i>	8
5.1.3 Clasificación científica del <i>Agave tequilana</i>	9
5.1.4 Características morfológicas del <i>Agave</i>	9
5.1.5 Hojas del <i>Agave</i>	9
5.2 Industrialización del <i>Agave tequilana</i>	10
5.3 Subproductos agrícolas y residuos agroindustriales	11
5.4 Fibras vegetales	12
5.4.1 Estudio de la pared celular	12
5.4.2 Características generales de la pared celular	13
5.4.3 Componentes de la pared celular vegetal	13

Sección	Página
5.4.3.1 Glicoproteínas	13
5.4.3.2 Otros Componentes	14
5.4.4 Celulosa	14
5.4.5 Hemicelulosa	15
5.4.6 Lignina	16
5.4.7 Sustancias pécticas	17
5.4.8 Polifenoles y taninos	17
5.4.9 Proteínas	18
5.4.10 Componentes de naturaleza lipídica	18
5.4.11 Sales minerales	18
5.5 Fibra dietética	18
5.5.1 Clasificación de la fibra dietaría	20
5.5.1.1 Fibras fermentables y no fermentables	20
5.5.1.2 Fibras solubles e insolubles	21
5.5.2 Compuestos asociados a la fibra	23
5.6 Efectos fisiológicos de la fibra	25
5.6.1 Volumen de las heces	25
5.6.2 Velocidad de tránsito intestinal	25
5.6.3 Capacidad de absorber sustancias	26
5.6.4 Fermentación colónica y el cáncer	27
5.6.5 Ácidos grasos de cadena corta	28
5.7 Fuentes de fibra	30

Sección	Página
5.8	Obtención industrial de fibra dietética 31
5.9	Métodos analíticos para determinación de fibra 33
5.9.1	Métodos para la determinación de fibra bruta 33
5.9.2	Método de detergente 34
5.9.3	Métodos enzimáticos y gravimétricos 35
5.9.4	Métodos de fraccionamiento 36
5.10	Tratamientos para la extracción de fibra 37
5.10.1	Tratamiento con temperatura 37
5.10.2	Tratamiento por explosión en vapor de agua 38
5.10.3	Tratamiento con soluciones químicas 38
5.11	Propiedades funcionales de la fibra 39
6.	MÉTODOS 42
6.1	Campos de cultivo y toma de muestras 42
6.2	Descripción del diagrama de flujo general 42
6.2.1	Acondicionamiento de hojas 42
6.2.2	Operaciones de Pretratamiento 43
6.2.3	Extracción 43
6.2.4	Deshidratado 44
6.2.5	Pulverizado 44
6.2.6	Cuantificación de fibra neutro detergente (FND) 46
6.2.7	Cuantificación de fibra ácido detergente 47
6.2.8	Cuantificación de lignina ácido detergente 48

Sección	Página
6.2.9 Evaluación de propiedades funcionales por métodos físicos	49
6.3 Evaluación de propiedades funcionales por métodos biológicos	50
6.3.1 De los animales de experimentación	50
6.3.2 De la preparación y análisis de las raciones de alimento	51
6.3.3 De las variables en estudio	52
6.3.3.1 Peso de las heces	53
6.3.3.2 Volumen aparente de las heces	53
6.3.3.3 Grasa en las heces excretadas	53
6.3.3.4 Tiempo de tránsito intestinal	54
6.4 Diseño estadístico	54
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
7.1 Extracción de fibra por diferentes métodos	55
7.1.1 Tratamiento por el método I (referencia)	55
7.1.2 Tratamiento por el método II (presión de vapor de agua)	55
7.1.3 Tratamiento por el método III (solución ácida)	58
7.2 Propiedades funcionales de la fibra por métodos físicos	62
7.2.1 Capacidad de absorción de agua (CAA)	63
7.2.2 Capacidad de retención de agua (CRA)	66
7.2.3 Capacidad de adsorción de aceite (CAG)	69
7.3 Propiedades funcionales de la fibra por métodos biológicos	72

Sección	Página
7.3.1 Composición proximal de los alimentos	72
7.3.2 Peso de las heces	73
7.3.3 Volumen de las heces	76
7.3.4 Ganancia de peso de las ratas y eficiencia de conversión alimenticia	79
7.3.5 Contenido graso en las heces	81
7.3.6 Tiempo de transito intestinal	83
8. CONCLUSIONES	86
9. LITERATURA CITADA	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1	Solubilidad y fermentabilidad de las fibras	23
2	Acciones de los componentes de la fibra en el organismo	26
3	Relación entre las propiedades fisicoquímicas de la fibra y sus efectos fisiológicos	29
4	Tipos de enzimas utilizados por cada autor	35
5	Propiedades funcionales de diferentes alimentos	41
6	Composición de reactivos para solución neutro detergente	46
7	Distribución de animales de experimentación en jaulas individuales	51
8	Formulación de dietas para ensayos biológicos	52
9	Valor de FND (b.s.) extraídos por método I	55
10	Valor de FND (b.s.) extraídos por método II	57
11	Requerimientos de energía para los tratamientos de extracción por MII	58
12	Valor de FND (b.s.) extraídos por MIII	60
13	Requerimientos de energía para los tratamientos de extracción por método III	61
14	Fracción de los componentes de fibra insoluble	63
15	Capacidad de absorción de agua (CAA)	64
16	Capacidad de retención de agua (CRA)	67
17	Capacidad de adsorción de aceite (CAG)	70
18	Composición proximal de las dietas experimentales	73
19	Peso de las heces excretadas por las ratas	74
20	Volumen aparente de las heces excretadas por las ratas	77
21	Contenido graso de las heces excretadas por las ratas	82
22	Tiempo de tránsito intestinal	84

ABREVIATURAS

Ácidos grasos de cadena corta	AGCC
Association of Official Analytical Chemistry	AOAC
Capacidad de adsorción de grasa	CAG
Capacidad de absorción de moléculas orgánicas	CAMO
Capacidad de absorción de agua	CAA
Capacidad de hinchamiento	CH
Capacidad de intercambio iónico	CII
Capacidad de retención de agua	CRA
Fibra ácido detergente	FAD
Fibra dietaria	FD
Food and Drug Administration	FDA
Fibra neutro detergente	FND
Fructoligosacáridos	FOS
Lignina ácido detergente	LAD
Low density lipoprotein (Lipoproteínas de baja densidad)	LDL
Materia seca	MS

1. RESUMEN

En el presente trabajo de investigación, en la primera etapa se estudiaron diferentes métodos de extracción de la fibra proveniente de las hojas de *Agave tequilana* Weber; siendo las condiciones para el **MI** (referencia), de 15 min., 90°C y 1:2p/v de relación **M:H₂O**; para el **MII**, con variables de presión de vapor (kg_f/cm^2) con tres niveles (0.5, 0.75 y 1.0), el tiempo (min.) con tres niveles (5, 10 y 15), y la relación **M:H₂O** (p/v) con dos niveles (1:2 y 1:3); y para el **MIII**, con variables de tiempo (min.) con tres niveles (5, 10 y 15), temperatura (°C) con tres niveles (70, 80 y 90) y la concentración del ácido (N de HCl) con dos niveles (0.1 y 0.4). Por cada método se seleccionó un tratamiento, teniendo como variable de respuesta a la concentración de **FND** y criterios adicionales. Los resultados reportaron diferencias significativas entre los tratamientos ($\alpha=0.05$) por cada método; por el que se aplicó la comparación múltiple de medias, cuyos valores más altos de **FND** fueron siete y catorce tratamientos respectivamente sin presentar diferencias significativas ($p<0.05$); por lo que considerando el factor de costos en función al requerimiento de energía para el tratamiento, se seleccionó el tratamiento de $0.5\text{kg}_f/\text{cm}^2$, 5min. y 1:3p/v. con un valor de **FND** de 46.74% para **MII** y de 70°C, 5min. y 0.1N HCl con un valor del **FND** de 65.14% para el **MIII**.

En la segunda etapa, las propiedades funcionales de la fibra, evaluado por métodos físicos tal como la capacidad de absorción de agua (**CAA**), capacidad de retención de agua (**CRA**) y la capacidad de adsorción del aceite (**CAG**); expresado en g de agua absorbida por g MS, g de agua retenida por g de MS y g de aceite adsorbido por g de MS respectivamente; reportaron valores promedios de 9.22, 7.54 y 4.70 para el **MI**; 9.83, 8.16 y 4.90 para **MII** y 4.31, 4.10 y 2.96 para **MIII** respectivamente, observándose un incremento para el tratamiento con presión de vapor de agua y una disminución para el tratamiento con solución ácida. Relacionando estas variables con otras fuentes de fibra

de origen vegetal; el producto en estudio presenta valores superiores en todos los casos, tal como respecto al salvado de trigo.

En la tercera etapa se evaluó las propiedades funcionales a través de ensayos biológicos mediante la inclusión de la fibra en proporciones de 5 y 10% en la dieta de los animales de experimentación cuyas variables de respuesta fueron el peso y el volumen de las heces fecales, la cantidad de grasa retenida y el tiempo de tránsito intestinal. Los resultados reportaron que ante un incremento de la proporción de la fibra, presentaron efectos fisiológicos favorables en todos los casos, características requeridas en una fibra para que pueda ser viable para su inclusión en alimentos. Comparado entre los diferentes métodos de extracción en función a la fibra comercial, tanto en la cantidad de grasa extraída y el peso de las heces fecales, presentaron similares comportamientos en todos los casos; sin embargo, la fibra extraída mediante el uso de presión es la que tuvo mejores resultados en la reducción del tiempo de tránsito intestinal.

ABSTRACT

In this investigation paper, in a first stage were studied different methods of fiber extraction from *Agave tequilana* Weber leaves, whit the follow conditions for **MI** (reference), 15 min., 90°C y 1:2 w/v of relation **M:H₂O**; for **MII**, whit steam pressure variables (kg_f/cm²) whit three levels (0.5, 0.75 y 1.0), the time (min.) whit three levels (5, 10 y 15), and the relation **M:H₂O** (w/v) whit two levels (1:2 y 1:3); and for the **MIII**, whit the variables in time (min.) whit three levels (5, 10 y 15), temperature (°C) three levels (70, 80 y 90) and the acid concentration (N de HCl) whit two levels (0.1 y 0.4). For each method were selected a treatment, having as answer variable the Neutral Detergent Fiber (**NDF**) concentration and additional criteria's. The results reported significative difference between the treatments ($\alpha=0.05$) for each method; therefore was applied the mean multiple comparison , in which the highest values of NDF were seven and fourteen treatments respectively whit out significative difference ($p<0.05$); considering that the costs in function of the energy requirements for the treatment , were selected the treatment of se 0.5kg_f/cm², 5min. y 1:3w/v. whit a value of **NDF** of 46.74% for **MII** and the 70°C, 5min. and 0.1N HCl whit a value of **NDF** of 65.14% for the **MIII**.

In the second stage, the functional properties of fiber were evaluated by physic methods water absorption capacity (**WAC**), water retention capacity (**WRC**) and the oil adsorption capacity (**OAC**); expressed in g of water absorbed by g MS, g of water retained by g of MS and g of adsorbed oil by g de MS respectively; reporting average values of 9.22, 7.54 and 4.70 for the **MI**; 9.83, 8.16 and 4.90 for **MII** and 4.31, 4.10 and 2.96 for **MIII** respectively, observing an increment for the water steam pressure treatment and a reduction in the treatment whit the acid solution. Relating the variables whit another's vegetable fiber sources; the studied product presents superior values in all the cases, as whit the wheat bran.

In the third stage the functional properties were evaluated by a biological assay with the fiber inclusion in 5 and 10% proportion in the diet of experiment animals with answer variables of weight and volume of the fecal feces, the quantity of fat retained and the intestinal transit time. The results reported that with an increment in the fiber proportions were favorable physiological effects in all the cases, required characteristics in a fiber for been viable for their inclusion in foods. Comparing between the different extraction methods in function of the commercial fiber, the fat extracted and the weight of the fecal feces present similar behaviors in all the cases; Even though, the extracted fiber with the use of pressure is the one with better results in the reduction of the intestinal transit time.

2. INTRODUCCIÓN

Las hojas de *Agave tequilana* Weber, son consideradas como un subproducto agroindustrial, cuyo componente mayoritario es la fibra insoluble, con potencial utilización como insumo en alimentos o de sustrato en procesos biotecnológicos. Hasta el momento se han llevado a cabo diferentes estudios para proponer un remedio a la problemática de este residuo agroindustrial; sin embargo, no existe una solución definitiva, por lo que la necesidad de desarrollar otras tecnologías para su aprovechamiento resulta evidente.

La química de la fibra alimentaria reside en la estructura de la pared celular, que está constituida por algunos polisacáridos como la celulosa, hemicelulosa, lignina y sustancias pécticas. La celulosa es un polímero lineal formado por unidades de glucosa unidas por enlaces $\beta(1,4)$ las que presentan fuertes uniones intermoleculares adquiriendo propiedades cristalinas, razón de su poca solubilidad en agua; en cambio la hemicelulosa está constituida por moléculas de xilosa, galactosa, manosa y otros, que no son digeribles en el intestino delgado humano, aunque se desdoblan parcialmente en el colon por la acción de la microbiota gracias a la presencia de zonas amorfas. Para que las fibras insolubles tengan efectos favorables en el organismo, es necesario elevar su concentración además de mejorar las propiedades funcionales expresado CAA, CRA y CAG; las que deben ser contrastados a través de bioensayos con animales de experimentación para medir parámetros como el incremento del peso y volumen de las heces, contenido de grasa fecal y el tiempo de tránsito intestinal.

Por consiguiente, en el presente trabajo se evaluó la eficiencia de diferentes métodos de extracción de la fibra proveniente de las hojas de *Agave tequilana* Weber, conducentes al aprovechamiento de esta materia prima con fines alimentarios.

3. HIPÓTESIS

Si se modifica las variables fisicoquímicas de un método previamente normalizado para la extracción de la fibra proveniente de hojas del *Agave tequilana* Weber; es factible incrementar la concentración de fibras insolubles expresado en FND y mejorar las propiedades funcionales expresadas en parámetros físicos y biológicos.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Evaluar diferentes métodos de extracción de la fibra a partir de las hojas del *Agave* para incrementar su concentración, además de mejorar las propiedades funcionales orientadas para la utilización en alimentos.

4.2 Objetivos particulares

- 4.2.1** Comparar diferentes métodos de extracción de la fibra y seleccionar un tratamiento por cada método en función a la concentración de fibra neutro detergente (FND).
- 4.2.2** Evaluar las propiedades funcionales de las fibras obtenidas por diferentes métodos mediante parámetros físicos
- 4.2.3** Evaluar las propiedades funcionales de las fibras obtenidas por diferentes métodos mediante parámetros biológicos.

5. ANTECEDENTES

5.1 *Agave*

5.1.1 Generalidades del *Agave*

El *Agave* es un género de planta monocotiledónea, originaria de las regiones desérticas occidentales, económicamente muy importante y cuenta con 136 especies (Castro, 2007). Desde la época prehispánica los agaves han sido usados por los seres humanos y continúan siendo ampliamente utilizados como fuente de alimentos, bebidas, materiales de construcción y medicinas naturales (Arizaga y Escurra, 2002). Algunos de ellos eran consumidos por los antiguos habitantes de México, siendo apetecibles por su alto contenido de azúcar. El *Agave tequilana* Weber es una planta xerófila (que crece en zonas áridas y cálidas) cuyas hojas son de color azul verdoso delgadas y casi planas, que mide aproximadamente 1.25 m de largo y 10 cm de ancho y tiene una espina terminal de color rojo oscuro de 2 cm (Granados, 1993).

5.1.2 *Agave tequilana*

La planta del *Agave tequilana* Weber variedad azul, goza de ciertas características que la hacen diferente de otros agaves, ya que es una planta carnosa en forma de roseta, fibrosa de color azul o verde grisáceo originado por un alto contenido de ceras que impiden que la planta pierda agua. Sus hojas son rígidas con espinas apicales y marginales. Es el principal producto económico del estado de Jalisco en México, se utiliza como única materia prima básica para la elaboración del Tequila, a pesar de existir diferentes variedades de Agaves. Las plantaciones se encuentran distribuidas a lo largo de cinco estados de la república (Jalisco, Michoacán, Nayarit, Guanajuato, Tamaulipas) y solamente en estos lugares se puede utilizar la materia prima para la elaboración del tequila (Gentry, 1982).

5.1.3 Clasificación científica del *Agave tequilana*

Reino	: <i>Plantae</i>
División	: <i>Magnoliophyta</i>
Clase	: <i>Liliopsida</i>
Subclase	: <i>Liliidae</i>
Orden	: <i>Asparagales</i>
Familia	: <i>Agavaceae</i>
Género	: <i>Agave</i>
Especie	: <i>Agave tequilana</i> Weber

Fuente: Flores y Morales (2005)

5.1.4 Características morfológicas del *Agave*

Dentro de las características principales del género *Agave* destacan las siguientes: son plantas perennes, suculentas, monocotiledóneas, con raíces duras fibrosas, tallos gruesos y muy cortos. Las hojas son generalmente verdes; sin embargo, también pueden ser blancas o grisáceas. La superficie puede ser muy áspera al tacto o muy suave, la mayoría son largas, gruesas hacia la base y están arregladas en rosetas basales con espinas laterales y en las puntas. La espina terminal puede ser corta o muy larga, acanalada totalmente o en partes con sección transversal, redondeada y aplanada. El color de las espinas puede ser blanco grisáceo o moreno rojizo. Las plantas de este género presentan varias adaptaciones a su medio; tienen la capacidad de acumular agua en las gruesas hojas suculentas lo que permite que estén especialmente adaptadas a la aridez (Arizaga, 1998; Arizaga y Ecurra, 1995; Eguiarte *et al.*, 2000; Gómez, 1963; Granados, 1993; McVaugh, 1989; Slauson, 2000).

5.1.5 Hojas del *Agave*

Las plantas del género *Agave*, tienen hojas cubiertas por una fina película de cera constituida fundamentalmente por alcoholes, ésteres, ácidos grasos e hidrocarburos además de gomas, pectinas, almidones, clorofila; que evitan la pérdida del agua (Guerra

de León *et al.*, 2007; Fernández, 2005). Físicamente son grandes, gruesas y carnosas que pueden almacenar cantidades considerables de agua (Castro, 2007). En la actualidad, el mayor uso que se le da a las pencas es en forma de forraje para animales, principalmente vacas lecheras. En San Luis de Potosí, ha sido estudiado por el “Fideicomiso del aguamiel y productos de su fermentación” junto con el Instituto Politécnico Nacional y la Universidad Nacional Autónoma de México y se observó que tenía un alto contenido de azúcares, materia mineral y fibra cruda lo cual validaba el uso de esta planta como forraje (Fernández, 2005). Además de las pencas se obtiene el “ixtle”, el cual es una fibra dura utilizada en la jardinería, pero hasta la fecha, no ha sido utilizada suficientemente (Barrios, 1982).

5.2 Industrialización del *Agave tequilana*

A partir de la planta del *Agave tequilana* Weber, se obtiene una de las bebidas más famosas a nivel nacional y mundial denominado “tequila”, para el que se utiliza la piña; las que son cortadas, luego llevadas a un horno en donde se realiza la operación de cocimiento con la finalidad de degradar azúcares complejos presentes en la piña en azúcares simples para que puedan ser utilizadas por la levadura en la operación de fermentación. El principal carbohidrato complejo presente en el *Agave* es la inulina, que es un polímero de fructuosa con un residuo terminal de glucosa, cuando ésta se degrada por la acción de la acidez del jugo y el calor en el cocimiento, se obtiene principalmente glucosa y fructuosa. En seguida se muelen las piñas para extraer el jugo que es colado en tinas y es inoculado con un cultivo de la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, responsables de la fermentación de los azúcares presentes en el jugo. Después el fermentado se destila, para obtener etanol y vinazas (mezcla de levaduras muertas, azúcares no fermentables y minerales). El tequila puede ser envasado inmediatamente después de la destilación o puede añejarse en barricas de madera, las que les confieren las características de sabor y color (Bautista *et al.*, 2001).

La producción del *Agave* tequilero en el año 2006, fue de 160284.98 hectáreas sembradas, con una producción de 1000045 toneladas métricas, el cual representa en términos económicos por un valor de 1234460.07 Pesos Mexicanos (SAGARPA, 2008). Además durante este mismo año, la Cámara Nacional de la Industria Tequilera (CNIT) contó con 79 empresas productoras de tequila, 77 en el estado de Jalisco, 01 en Guanajuato y 01 en Tamaulipas; siendo la producción de 242670216 litros con 40% de alcohol (Cámara Nacional de la Industria Tequilera, 2006).

5.3 Subproductos agrícolas y residuos agroindustriales

Los desechos sólidos son los residuos que se generan debido a las actividades humanas, los que generalmente se desechan como inútiles. Se obtienen como un subproducto de las actividades comerciales, industriales o agrícolas, y por lo general son una gran fuente de contaminación, por lo que actualmente se buscan alternativas de uso de estos residuos (Kadirvelu *et al.*, 2003; Reed y Williams, 2003). La industria agrícola es una de las principales fuentes de generación de residuos sólidos, las que están constituidos principalmente por los tallos, raíces, hojas u otras partes de las plantas que no son utilizadas en estos procesos (Shah *et al.*, 2005; Gañan *et al.*, 2004). La masa residual generada por las actividades de producción, no presenta en la mayoría de los casos valor económico alguna por lo que debe ser eliminada; sin embargo, su posible aprovechamiento como fuente de energía ó como productos de valor presentaría numerosas ventajas (Moya *et al.*, 2005).

Así, en muchas industrias se produce una gran cantidad de residuos vegetales, ya que de la planta solamente se aprovecha el fruto, teniendo que disponer de las demás partes de la planta tal como pseudotallo, hojas y pinzote o raquis. Debido a que estos materiales están constituidos por fibras lignocelulósicas, se podrían utilizar como materia prima para la obtención de celulosa (Cordeiro *et al.*, 2004) o en la obtención de materiales compuestos (Gañan *et al.*, 2004; González *et al.*, 2002; Thomas *et al.*, 1997) con lo que se les proporcionaría un valor agregado a dichos residuos.

Recientemente, el interés por encontrar nuevos usos para fibras procedentes de cosechas ha ido aumentando debido a la sobreproducción de residuos agrícolas y del área alimenticia. En Estados Unidos, la mayoría de los granjeros son obligados a incinerar el excedente de sus cosechas; aproximadamente 250 millones de toneladas de residuos agrícolas anualmente. La quema de los residuos agrícolas desprende partículas y emisiones tóxicas contribuyendo en gran medida a la contaminación ambiental, provocando serios riesgos y problemas en la salud de los granjeros además de la pérdida de oportunidades de desarrollo económico de comunidades rurales.

La mayor importancia del *Agave* está en la industrialización de las piñas para la producción del tequila, quedando las pencas como subproducto agroindustrial, ricas en el contenido de fibra insolubles compuesto por la celulosa, hemicelulosa y lignina. Estudios efectuados concluyen que del total del peso fresco de la planta, 54% corresponde al peso de la “piña”, 32% al peso del material que podría ser utilizado como fuente de carbohidratos y fibra, y al restante 14%, quedando sin utilidad aparente (Iñiguez *et al.*, 2007).

5.4 Fibras vegetales

5.4.1 Estudio de la pared celular

La química fundamental de la fibra alimentaria reside en la estructura de la pared celular (Carpita, 1990). Esta pared es una capa gruesa y consistente que rodea a la membrana plasmática de las células vegetales. Fue la primera estructura celular detectada según Carpita (1990) y, a pesar del tiempo transcurrido, aún hoy día no se conoce con exactitud. La pared celular está constituida mayoritariamente por polisacáridos y proteínas, íntimamente asociados y entrelazados formando un complejo entramado reticular responsable de las propiedades morfológicas y mecánicas de la célula vegetal (Rodríguez, 1993).

5.4.2 Características generales de la pared celular

La pared celular es una de las particularidades que diferencia a los organismos vegetales de los animales. Sus características generales se pueden resumir de la siguiente forma (Rodríguez, 1993):

- Presenta una estructura muy organizada que confiere rigidez y fuerza, considerándose como el exoesqueleto que proporciona el sostén mecánico que el vegetal necesita.
- Ejerce una función protectora frente al medio ambiente (deseccación, agentes extraños), actuando como una barrera.
- Aísla y al mismo tiempo comunica unas células con otras mediante los plasmodesmos que permiten el paso de determinadas sustancias sin ejercer un control activo sobre este transporte.
- El desarrollo de la pared está íntima y recíprocamente relacionada con el de la célula vegetal. Sus componentes se sintetizan en el interior celular y la pared se va secretando desde el hialoplasma hacia el exterior. El proceso de crecimiento y diferenciación celular son en elevada proporción, consecuencia de la síntesis y organización de la pared celular.

5.4.3 Componentes de la pared celular vegetal

Rodríguez (1993); clasifica los componentes de la pared celular en tres grupos:

Polisacáridos estructurales:

- Celulosa
- Hemicelulosa
- Sustancias Pécicas

Glicoproteínas:

- Estructurales
- Enzimáticas

Otros Componentes:

- Lignina
- Cutina
- Suberina
- Ceras
- Taninos
- Sales Minerales

5.4.4 Celulosa

La celulosa es el polisacárido mayoritario de los vegetales y el polímero natural más abundante en la tierra que constituye una fuente de glucosa prácticamente inagotable que se renueva en forma continua mediante la fotosíntesis (Badui, 2006). Se localiza en las membranas celulares de las plantas, donde aportan rigidez a los mismos. Generalmente se encuentran formando masas amorfas de las que participan también otras estructuras como hemicelulosa, pectinas o ligninas. Este homopolisacárido lineal es similar en todas las plantas y consiste en estructuras repetidas de enlaces $\beta(1-4)$ enlazando unidades de D-glucopiranosas que pueden alcanzar 4 μm (Figura 1). Presentan un ordenamiento en el que sus oxidrilos generan fuertes uniones intermoleculares adquiriendo propiedades cristalinas. Las fibras de celulosa son extremadamente resistentes al estirado, debido a que sus cadenas paralelas se alinean sobre un eje longitudinal y establecen un gran número de puentes de hidrógeno intermoleculares, que da origen a microfibrillas (rodeadas de ligninas y hemicelulosas) altamente estructuradas (Molina y Martín, 2007). A pesar de tener muchos hidroxilos libres es poco soluble en agua y prácticamente insoluble en la mayoría de los disolventes, debido a que estos grupos no se hidratan por estar actuando entre sí (Hernández *et al.*, 1995).

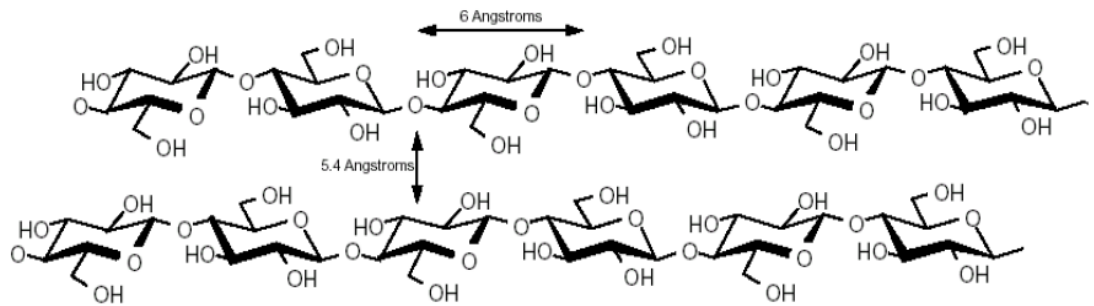


Figura 1. Macromolécula de la celulosa, compuesta de restos de β -glucopiranososa unidos por enlaces (1 \rightarrow 4).

Por ser un polímero lineal de alto peso molecular formado por unidades de D-glucosa unidos por enlaces $\beta(1,4)$; hace que no pueda degradarse por la amilasa del intestino humano. La celulosa es el componente mayoritario de los materiales lignocelulósicos, es la sustancia natural más importante, tanto por su abundancia como por su aprovechamiento tecnológico, convirtiéndose actualmente como la base de muchos productos de interés industrial entre ellos: papel, fibras, aditivos, etc. (Molina y Martín, 2007).

5.4.5 Hemicelulosa

Junto a la celulosa, son los polisacáridos mayoritarios de la pared celular. Los principales azúcares que constituyen la hemicelulosa son de la serie D: xilosa, galactosa, manosa, glucosa y ácido galacturónico; y la serie L: arabinosa, ramnosa y fructosa (Figura 2). La hemicelulosa no se digiere en el intestino delgado humano, aunque sí se desdoblan parcialmente en el colon por la acción de la microbiota (Molina y Martín, 2007). Todas las hemicelulosas poseen dos características estructurales comunes: son polímeros que presentan una cadena principal plana de azúcares, unidos casi siempre mediante enlaces $\beta(1,4)$ de la que pueden salir un número variable de ramificaciones laterales cortas (Barceló *et al.*, 1992). Generalmente son solubles en soluciones alcalinas

concentradas (18 a 24% de los hidróxidos de sodio o de potasio), presentan una estructura amorfa aun cuando algunos tipos desarrollan una forma fibrilar (Badui, 2006). Si se atiende a las propiedades químicas, entonces, se tendrían: hemicelulosas A, que precipitan con ácido acético y hemicelulosas B, que precipitan con etanol (Southgate, 1969).

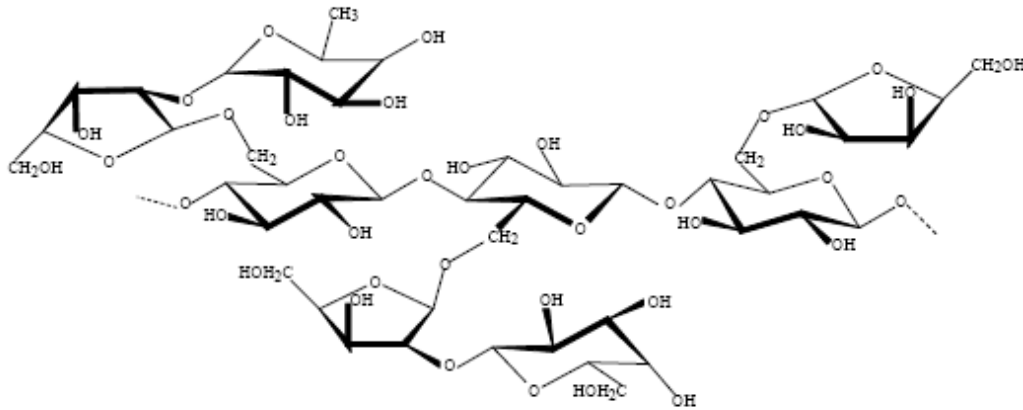


Figura 2. Estructura básica de una hemicelulosa, de la fracción de los xiloglucanos de un ejemplo de una variedad de judías (Belitz y Grosch, 1997).

5.4.6 Lignina

Después de la celulosa es el polímero más abundante en el mundo vegetal y su función es asegurar protección contra la humedad y los agentes atmosféricos además de actuar como elemento aglomerante de las fibras, son macromoléculas heterogéneas que forman polímeros por copolimerización oxidativa de alcoholes fenólicos. Forman la estructura de la parte más dura o leñosa de los vegetales y son totalmente indigeribles (Molina y Martín, 2007). Químicamente la lignina es un polímero tridimensional amorfo constituido a partir de unidades fenilpropano que se unen entre sí por enlaces tipo alquil-aryl-éter o carbono-carbono. La estructura y composición, así como su contenido relativo en el lignocelulósico, dependen de las diferentes especies. La lignina se puede definir como polímero de alto peso molecular, que se forma por deshidrogenación enzimática y posterior polimerización de los alcoholes aromáticos, principalmente, coniferol, cumarol

y sinapinol. Es un compuesto que carece de estructura única ya que su síntesis se lleva a cabo sin control enzimático de la polimerización que tiene lugar al deshidrogenarse los alcoholes fenólicos (Lewis y Yamamoto, 1990).

Debido al elevado tamaño molecular de la lignina, la gran estabilidad de su estructura y su unión covalente con los polisacáridos (hemicelulosas y celulosa), la lignina confiere a la pared una gran rigidez, que 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).

5.4.7 Sustancias pécticas

Con este nombre se engloban un grupo de sustancias asociadas a la hemicelulosa. Llenan los espacios intercelulares en tejidos jóvenes y proporcionan firmeza y textura a frutas y hortalizas. Son macromoléculas coloidales capaces de absorber gran cantidad de agua (hidrocoloides) y formadas esencialmente por ácido D-galacturónico unidos por enlaces $\alpha(1,4)$. Las pectinas se encuentran asociadas con otros hidratos de carbono, principalmente con hemicelulosa, en las paredes celulares de los vegetales (Badui, 2006). Las sustancias pécticas son solubles en agua y tienen capacidad de formar geles en presencia de ácidos, sales y azúcares. No se absorben ni se digieren en el intestino delgado, aunque experimentan hidrólisis y fermentación en el colon, con formación de dióxido de carbono y ácidos grasos de cadena corta (Redondo *et al.*, 1996).

5.4.8 Polifenoles y taninos

Junto a la lignina, forman parte de las paredes celulares. Son componentes minoritarios de la pared pero que influyen en sus propiedades y funcionalidad. En algunas ocasiones se han determinado junto con la lignina obteniéndose valores anómalos de la misma. Pueden ser hidrolizables, liberando como productos de hidrólisis

a la glucosa y ácidos fenólicos, como el gálico y no hidrolizables, formados por flavanos. Se pueden extraer del vegetal mediante soluciones alcalinas y soluciones detergentes (Molina y Martín, 2007).

5.4.9 Proteínas

Son cadenas pépticas ricas en hidroxiprolina unidas de forma covalente a cadenas de arabinanos y galactanos (Molina y Martín, 2007). En las paredes celulares se han detectado también glicoproteínas enzimáticas, en su mayor parte hidrolasas (glucanasas, galactosidasas, etc.) y peroxidasas capaces de actuar sobre los componentes de la pared (Guardiola y García, 1990).

5.4.10 Componentes de naturaleza lipídica

Aparecen normalmente recubriendo la pared celular y ejerciendo una acción impermeabilizante (Molina y Martín, 2007). Se ha identificado tres como los compuestos de naturaleza lipídica, que cuando se presentan en la célula originan modificaciones de la pared celular: cutinización y suberificación, fundamentalmente (Rodríguez, 1993).

5.4.11 Sales minerales

Del resto de los compuestos asociados a las paredes celulares es importante citar la sílice y otras sales minerales como carbonato cálcico, carbonato de magnesio y oxalato cálcico. Cuando se presentan de forma anómala en la pared celular, producen su mineralización (Rodríguez, 1993).

5.5 Fibra dietética

La fibra dietética comprende una amplia variedad de materiales complejos y es, por tanto, difícil de conceptualizar. No existe una definición aceptada

internacionalmente, pero varios autores han tratado de definirla desde mediados del siglo pasado. Hipsley en 1953 fue el primer científico que reflejó por escrito el término de fibra dietética, definiéndolo como “los constituyentes no digeribles que se encuentran en la pared de la célula vegetal”, haciendo sinónimo el término de fibra vegetal con el de fibra dietética (Hipsley, 1953). Posteriormente Burkitt y Trowell adoptan un término más amplio y definen la fibra dietética como “el remanente de los componentes de la planta que son resistentes a la hidrólisis por las enzimas intestinales humanas” (Burkitt y Trowell, 1975). Este concepto engloba a los componentes de la pared celular como celulosas, hemicelulosas y lignina, y a otros polisacáridos presentes en las plantas como las gomas, mucílagos, celulosas modificadas, oligosacáridos y pectinas, que son comestibles y resistentes a la digestión.

En esa época diversos estudios epidemiológicos encuentran una correlación entre el consumo de determinados alimentos no digeribles y la disminución de ciertas patologías, como el estreñimiento, la obesidad, la diabetes, la enfermedad coronaria e incluso determinados tipos de cáncer, proponiendo la conocida “hipótesis de la fibra dietética” (Kim, 2000). El motivo para incluir estos nuevos componentes de las plantas se basaba en las propiedades fisiológicas atribuidas a la fibra dietética, pero no necesariamente a su similitud química o a su situación en la pared celular.

En el año 2001, la *American Association of Cereal Chemist (AACC)* amplió aún más este concepto. La fibra dietética es la parte comestible de las plantas o carbohidratos análogos que son resistentes a la digestión y absorción en el intestino delgado, con completa o parcial fermentación en el intestino grueso; también incluye polisacáridos, oligosacáridos, lignina, y sustancias asociadas de la planta; promoviendo efectos beneficiosos fisiológicos como el laxante, que atenúa los niveles del colesterol y la glucosa en la sangre (AACC, 2001).

5.5.1 Clasificación de la fibra dietaría

La fibra dietética puede clasificarse bajo los siguientes aspectos: 1) según su relación con la estructura de las paredes celulares de los vegetales, 2) desde el punto de vista fisiológico, 3) según su naturaleza química y 4) de acuerdo con la solubilidad en agua; siendo esta última la más importante desde el punto de vista nutritivo (Álvarez, 2001). Por su parte Velázquez de Castro (2007), clasifica a las fibras en función de dos de sus propiedades, que son responsables de la mayoría de sus beneficios fisiológicos: capacidad de fermentabilidad y comportamiento en contacto con el agua (solubilidad).

5.5.1.1 Fibras fermentables y no fermentables

La fibra llega al intestino grueso de forma inalterada. Aquí, al contrario de lo que ocurre con las enzimas digestivas humanas del intestino delgado, las bacterias del colon, con sus numerosas enzimas de gran actividad metabólica, pueden digerir en mayor o menor medida la fibra dependiendo de su composición química y de su estructura (Velázquez de Castro, 2007). El ciego es un receptáculo donde se almacenan las heces durante un cierto tiempo y donde las bacterias intestinales degradan la fibra consumida, así como los carbohidratos solubles malabsorbidos en el intestino delgado, como lactosa y fructosa, y los carbohidratos endógenos, como las mucinas y las glucoproteínas del intestino grueso. Estas reacciones son tan intensas que el valor del pH desciende bruscamente de 7-7.5 a 6-6.5 y la temperatura sube aproximadamente 0.7°C (Redondo, 2002). Las moléculas complejas son desdobladas a hexosas, pentosas y alcoholes que ya no pueden ser absorbidos en el intestino grueso, sirviendo de sustrato a otras colonias bacterianas que degradan a hidrógeno, metano y dióxido de carbono; responsables del cierto grado de flatulencia, ácido láctico y, especialmente AGCC. En estos procesos se produce una gran cantidad de energía que es aprovechada por las bacterias que realizan esta fermentación (Cummings y Branch, 1986).

Es importante tener en cuenta que la degradación total o parcial de la fibra en el colon no sólo depende del tipo de ésta, sino también de la velocidad con que se realiza el tránsito a lo largo del mismo; en el caso de un tránsito rápido, la cuota de degradación es

más pequeña que si acontece de forma lenta (El Oufir *et al.*, 2000). Todos los tipos de fibra a excepción de la lignina pueden ser fermentadas por las bacterias intestinales, aunque en general las solubles lo son en mayor cantidad que las insolubles. Así, las pectinas, gomas o mucílagos tienen un grado de fermentabilidad del 80-95%, mientras que la celulosa lo tiene entre un 15-50% (Redondo, 2002). En función de la fermentación bacteriana, la fibra puede dividirse en:

- **Fibras no fermentables (<10%)**, entre éstas se destaca fibras insolubles como la lignina y algunas fibras solubles como la carragenina, la metilcelulosa y la carboximetilcelulosa.
- **Fibras parcialmente fermentables (10-70%)**, donde destacan las fibras insolubles rica en celulosa. También pueden entrar en este grupo algunas fibras solubles como el agar y otras parcialmente solubles como las semillas de plantago o el salvado de arroz.
- **Fibras fermentables (>70%)**, están constituidas por fibras solubles ricas en hemicelulosas (goma guar, glucomanano) o ricas en ácidos glucurónicos (pectinas o algunas gomas). También se incluyen en este grupo los fructanos.

5.5.1.2 Fibras solubles e insolubles

El comportamiento de las distintas fibras en relación con el agua es muy diverso y depende de muchos factores (Mateu, 2004), entre los que podemos señalar la prevalencia de grupos hidroxilo y carboxilo, y la estructura tridimensional. Los grupos hidroxilos presente en la fibra establecen puentes de hidrógeno con las moléculas del agua; los grupos carboxílicos, a través de interacciones iónicas más fuertes, se unen con iones metálicos y éstos a su vez con el agua. Esta unión además favorecerá la orientación de las moléculas del agua. En tercer lugar la presencia de la estructura tridimensional de los polímeros, lineal o ramificada, permite la acumulación del agua en la matriz de la fibra (Velázquez de Castro, 2007).

Debido al diferente comportamiento en relación con el agua, se habla de fibras solubles y fibras insolubles (Tabla 1), condicionando de forma importante sus efectos fisiológicos (Southgate *et al.*, 1978). Las fibras solubles en contacto con el agua forman un retículo donde ésta queda atrapada, originando soluciones de gran viscosidad. Son fibras con elevada capacidad para retener agua. Entre ellas podemos destacar las pectinas, algunas hemicelulosas, las gomas, los mucílagos y los polisacáridos procedentes de algas. La capacidad gelificante es el responsable de muchos de los efectos fisiológicos de la fibra, como la disminución de la glucemia postprandial y de los niveles plasmáticos del colesterol (Mateu, 2004).

Las fibras insolubles, como la celulosa, diversas hemicelulosas y la lignina, se caracterizan por su escasa capacidad para formar soluciones viscosas. Estas fibras pueden retener agua, aunque esta capacidad es siempre menor que en el caso de las solubles. Las características físicas pueden influir también en la capacidad de captar agua, así por ejemplo, es muy importante el tamaño de la partícula ingerida. El salvado de trigo finamente molido capta un 26% menos de agua que el no molido (Redondo, 2002).

Finalmente, es interesante resaltar que los procesos de fermentación en el intestino grueso pueden afectar a la capacidad de retención hídrica de los diferentes tipos de fibra. Así, las fibras que contienen componentes insolubles tales como la celulosa y hemicelulosa, con menor grado de retención acuosa inicial, tienden a tener un mayor efecto sobre la retención final de agua y por tanto, un mayor peso fecal que las solubles. La razón de este hecho, aparentemente paradójico, radica en que las fibras solubles que retienen más agua en los segmentos digestivos iniciales son fermentadas por la microbiota intestinal colónica, con lo que se produce más masa bacteriana que contribuye a la masa fecal, pero desaparece el agua que retenían. Por el contrario, la fibra insoluble es mucho menos atacable por la microbiota, contribuyendo decisivamente a los contenidos fecales por el residuo no digerido y el agua retenida, aunque en principio esta última era menor comparativamente con la que retenía la fibra soluble. En

este sentido, el salvado de trigo, rico en celulosa y hemicelulosa no soluble, aumenta mucho el residuo no digerido, mientras que la fibra de frutas y verduras y otros polisacáridos solubles fermentan en gran proporción dando lugar a una menor masa fecal, aunque produzcan una gran masa bacteriana (Velázquez de Castro, 2007).

Tabla 1
Solubilidad y fermentabilidad de las fibras

Fermentabilidad	Principalmente solubles	Soluble + Insolubles	Principalmente insolubles
Fermentables (>70%)	Pectina Goma guar Goma arábica Tragacanto Fructanos		
Parcialmente fermentables (10-70%)	Agar <i>Plantago ovata</i> (cáscara)	Salvado de arroz <i>Plantago ovata</i> (semilla)	Salvado de trigo Celulosa
No fermentables (<10%)	Carragenina Karaya		Lignina

Fuente: Velázquez de Castro (2007).

5.5.2 Compuestos asociados a la fibra

Hay muchos compuestos que se podrían asociar dentro de la fibra alimentaria como almidón resistente, proteína resistente, compuestos de la reacción de Maillard, oligosacáridos no digeribles y sales de ácido fítico. Estos compuestos llegan hasta el colon y producen efectos similares a los producidos por polisacáridos de la pared celular (Molina y Martín, 2007).

La inulina es un hidrato de carbono de reserva de las plantas y muy en particular en las gramíneas y plantas compuestas (ajos, alcahofas, etc.). Se componen de una cadena de unidades de fructosa (2-60) con una unidad de glucosa terminal. La

oligofruktosa (FOS) se define como una fracción de oligosacáridos con grado de polimerización menor de 20, aunque los productos comerciales suelen tener un valor medio de 9 (fructooligosacáridos). Los FOS se obtienen a escala industrial por medio de procesos enzimáticos a partir de la sacarosa, partiendo de un jarabe obtenido de remolachas que presenta una conversión enzimática a través de la enzima fructosilfuranosidasa que se extrae del microorganismo *Aspergillus niger* (Flickinger *et al.*, 2003).

Los hidratos de carbono no digeribles tienen efectos asociados tradicionalmente a la fibra dietética (FD). En el intestino delgado, la FD se dispersa en agua, con lo que aumenta su volumen y su viscosidad. Estas propiedades están asociadas con la disminución del tránsito intestinal y la absorción de nutrientes; también están asociadas con la reducción del colesterol y la atenuación de la glicemia alimentaria. En el intestino grueso, la fermentabilidad y el aumento de volumen de los hidratos de carbono no digeribles definen el papel esencial en el mantenimiento de la salud gastrointestinal. Hay evidencias que indican que la FD se fermenta en el intestino grueso, lo que favorece un aumento de la microbiota y, como consecuencia, una mayor producción de ácidos grasos de cadena corta. Estudios experimentales *in vitro* han demostrado que, en el caso de los fructooligosacáridos, son metabolizados selectivamente por las bifidobacterias, y que esta fermentación selectiva induce a una disminución del pH del medio, debido a la producción de grandes cantidades de lactato y acetato que inhiben el crecimiento de *E. Coli* y *Clostridium* además de otras bacterias patógenas como *Listeria*, *Shigella* o *Salmonella*. La fermentación selectiva de la inulina y FOS por las bifidobacterias también se ha demostrado *in vivo* mediante pruebas con voluntarios (Molina y Martín, 2007).

Por otro lado, la inulina y la oligofruktosa actúa de forma positiva sobre los niveles del colesterol, reduciendo el nivel de triglicéridos en el suero debido a la reducción de los ácidos grasos sintetizados por el hígado, a través de una reducción de la actividad de todas las enzimas hepáticas lipogénicas, habiéndose demostrado en

experimentos el efecto de una reducción en el valor de colesterol total y en la fracción cLDL durante el aporte de inulina en la dieta (Molina y Martín, 2007).

5.6 Efectos fisiológicos de la fibra

5.6.1 Volumen de las heces

La capacidad de retención de agua de la fibra hace que aumente el volumen del contenido intestinal. Al aumentar el volumen del contenido colónico, provoca un aumento de su peristaltismo, lo que facilita la función evacuatoria (Molina y Martín, 2007). El aumento del volumen fecal y el consiguiente estiramiento de la pared estimulan los mecanorreceptores y se producen los reflejos de propulsión y evacuación. Las sales biliares y los AGCC también estimulan la motilidad y aceleran el tiempo de tránsito intestinal (Sastre, 2003).

5.6.2 Velocidad de tránsito intestinal

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 (Monreal *et al.*, 2002). Como consecuencia de todo ello, el paso de la fibra a lo largo del aparato digestivo puede tener diversos efectos (Molina y Martín, 2007):

- Sensación de saciedad, lo que provoca una menor ingesta de alimentos.
- Regulación intestinal.
- Disminución del tiempo de tránsito intestinal de los alimentos.
- Control del estreñimiento y aumento de la excreción.
- Retraso de la absorción de glucosa y, por tanto, menor índice glicémico.
- Disminución del colesterol.
- Menor contenido calórico en la dieta.

- Mantenimiento y desarrollo de la microbiota intestinal.
- Mayor excreción de grasa y proteína.
- Factor preventivo de cáncer intestinal.

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).

Tabla 2
Acciones de los componentes de la fibra en el organismo

Tipo de fibra	Acción
Celulosa	Capacidad de retención de agua, reducción de presión colónica y reducción del tiempo de tránsito intestinal.
Hemicelulosa	Capacidad de retención de agua, incremento de la masa fecal, reducción de la presión colónica, reducción del tiempo de tránsito intestinal y posibilidad de retener ácidos biliares.
Pectinas, gomas y mucílagos	Retiene los ácidos biliares, reduce la evacuación gástrica e incrementa la fermentación colónica.
Lignina	Capacidad de retención de agua, ligado de minerales, aumento de excreción y posibilidad de incrementar la defecación

Fuente: Hernández *et al.* (1995).

5.6.3 Capacidad de absorber sustancias

Entre las mallas de la fibra vegetal pueden quedar retenidos algunas sustancias como el colesterol, los ácidos biliares y diversas sustancias tóxicas que se introducen en los alimentos. Por consiguiente la fibra, evita que entre en contacto con la mucosa intestinal, lo que favorece su eliminación por las heces de ciertas cantidades de calcio,

hierro, magnesio y cinc (Molina y Martín, 2007). Sin embargo; en la absorción de micronutrientes; uno de los minerales más estudiados es el calcio que puede perder parte de su disponibilidad en el intestino delgado con una dieta alta en fibra; pero, parte de este calcio atrapado y transportado hasta el colon se libera al hidrolizarse la fibra bajo la actividad microbiana y los AGCC producidos facilitan la absorción de este calcio a través de las paredes del colon e, incluso, de las del recto (Sastre, 2003).

En cuanto a los lípidos, el páncreas ejerce su función hidrolítica a través de la lipasa y precisa la formación de micelas previas, capaces de dispersarse por el medio acuoso del intestino. Una dieta abundante en fibra aumenta la presencia de grasa en las heces, ya que la fibra soluble reduce la emulsificación con la bilis y dificulta la escisión de los lípidos por acción de la lipasa pancreática. Es, tal vez, por este mecanismo por el que muchos estudios epidemiológicos han objetivado que las poblaciones con alto consumo de fibra tienen menor riesgo de padecer enfermedad cardiovascular. El Professional Health Study de los EE.UU., con más de 40000 profesionales de la sanidad, demuestra una baja incidencia de accidentes coronarios en aquellos que consumen 25 g/día de fibra y un 36% menos de riesgo cardiovascular que los que consumen una media de 10-12 g/día. Aunque hay cuestiones sujetas a controversia, parece que una ingesta adecuada de fibra desde la infancia-adolescencia disminuye la concentración de colesterol plasmático, descenso que afecta de manera positiva a la fracción LDL. Tal vez el aumento de la excreción de sales biliares obligue al hígado a una nueva síntesis, con una reducción automática de los valores plasmáticos de colesterol. También la producción de AGCC y la mayor lentitud en la absorción de glucosa, con menores concentraciones de insulinemia posprandial, podrían influir sobre factores de riesgo cardiovascular ligados a la síntesis de lípidos (Sastre, 2003).

5.6.4 Fermentación colónica y el cáncer

En el colon hay cientos de especies bacterianas distintas y las concentraciones alcanzan el 10^7 en el íleon terminal, 10^4 en el duodeno y 1000 bacterias/ml en el jugo gástrico. Se trata de un auténtico ecosistema con ciclos vitales interrelacionados, en el

que unas especies viven de los productos generados por otras (Guarner, 2000). Los géneros predominantes identificados están bacteroides, bifidobacterias, eubacterias, clostridios, etc., y otros subdominantes como enterobacterias, lactobacilos, estreptococos. Desde el punto de vista metabólico nutricional, una importantísima función de las bacterias del colon es su actividad sobre la fibra y los sustratos considerados como “prebióticos” (Sastre, 2003).

Una ingesta alta en fibra se asocia con un menor riesgo de cáncer colorrectal. Una de las hipótesis sobre el desarrollo de cáncer de colon y recto es que a partir de las excesivas cantidades de ácidos biliares en el intestino se forman algunas sustancias cancerígenas. La fibra tendrá un efecto beneficioso importante porque reduce la secreción de ácidos biliares e incrementa su excreción en las heces. Por otra parte, la alta capacidad de retención de agua puede diluir la concentración de agentes cancerígenos y también adsorberlos en su superficie. La fibra reduce el tiempo de contacto de las sustancias cancerígenas con las paredes del intestino. Además, el ácido butírico formado por la fermentación puede inhibir la formación de tumores, que se ve potenciada por el bajo pH que resulta de la fermentación de la fibra en el colon (Molina y Martín, 2007).

5.6.5 Ácidos grasos de cadena corta

La producción diaria de AGCC en el colon, con una dieta mixta normal, es de unos 200 mmol/día, de los que se excretan con las heces unos 7-20 mmol/día. El 85-95% de los AGCC producidos en el colon se absorbe por la mucosa. El butirato es rápidamente utilizado por los colonocitos, metabolizándose hasta CO₂ y cuerpos cetónicos. El propionato y acetato se absorben y son oxidados en el hígado, hasta un 40%. Una considerable proporción de acetato escapa a estos efectos y se metaboliza en los tejidos periféricos. Los AGCC producen energía: 1 g de fibra puede dar lugar a 8.4 kJ. La mayor parte de los gases es utilizada por las bacterias. Un tema interesante para efectos clínicos es que la absorción de los AGCC en la mucosa es altamente eficaz, alcanzando un porcentaje de utilización del 70%. Los AGCC suministrados por vía

venosa, a través del riego circulatorio del colon, sólo alcanzan un porcentaje del 21 al 30% de utilización por el colonocito (Schaafsma, 1997).

En síntesis sobre los efectos fisiológicos, Sastre (2003), concluye que la fibra insoluble tiene acciones sobre el aumento del volumen fecal, la frecuencia de deposiciones y la regulación del tránsito colónico. La fibra soluble retarda el tiempo de vaciado gástrico, aumenta el volumen fecal y regula el tránsito a través del colon; reduce, además, los índices de glucemia, retrasando su absorción, y los de colesterolemia total y fracción cLDL.

Tabla 3

Relación entre las propiedades fisicoquímicas de la fibra y sus efectos fisiológicos

Propiedad fisicoquímica	Efecto fisiológico
Viscosidad	Retardo del vaciamiento gástrico Disminución de la absorción de nutrientes Descenso del colesterol plasmático
Capacidad de retención de compuestos orgánicos	Descenso de absorción de nutrientes Descenso de colesterol plasmático
Susceptibilidad a la fermentación bacteriana	Descenso de colesterol plasmático Aumento de tránsito intestinal Aumento del peso de las heces
Capacidad de retención de agua	Aumento del peso de las heces
Capacidad de intercambio iónico	Descenso de absorción de cationes

Fuente: Rodríguez (1993).

5.7 Fuentes de fibra

Cada tipo de fibra se encuentra en alimentos diferentes. La celulosa es el compuesto más abundante de las paredes celulares de las plantas, de ahí su importancia cuantitativa en el conjunto de la fibra. En general, aportan cantidades muy importantes de celulosa las verduras, frutas, frutos secos y cereales. Una proporción mayoritaria del salvado de los cereales es celulosa. Las hemicelulosas se encuentran asociadas a la celulosa como constituyentes de las paredes celulares. Este hecho es muy interesante, ya que ambas sustancias forman parte de la cubierta externa (lo que constituye fundamentalmente el salvado), y por tanto el aporte en fibra va a ser muy diferente en función del grado de extracción de la harina, cuando se trata de pan u otros derivados de cereales. De ahí la importancia de los alimentos integrales en cuanto al aporte diario de fibra. Las pectinas incorporadas en los alimentos naturales son, junto a la celulosa y hemicelulosas, los tres componentes mayoritarios de la fibra alimentaria. El almidón se encuentra distribuido ampliamente en tubérculos, como la patata, en granos y semillas, en un gran número de frutos y en los rizomas de muchas plantas (Flickinger *et al.*, 2003).

La malta agotada es un alimento que se obtiene de la capa de aleurona y la fracción del escutelo de la cebada germinada. Contiene gran cantidad de fibra dietética insoluble (34%) y de proteína rica en glutamina (46%). El principal componente de la fibra de la malta agotada es la hemicelulosa, que adopta una estructura especial, permitiendo que la glutamina no sea atacada por las enzimas digestivas ni absorbidas hasta llegar al colon, donde la hemicelulosa es fermentada y la glutamina liberada al lumen (Kanauchi *et al.*, 1999).

El salvado de arroz es un subproducto obtenido en el proceso del pulido para la obtención de arroz blanco para consumo humano. Está constituida por parte de la almendra harinosa, la capa de aleurona, el germen y la cascarilla. Tiene una gran cantidad de fibra en una proporción soluble/insoluble 1:7. Esto se debe a que es un desecho industrial, ya que el arroz se comercializa mayoritariamente como arroz refinado (Reddy y Yang, 2006). Existen diferentes estudios que han mostrado los efectos

beneficiosos del salvado de arroz como laxante y para reducir los niveles plasmáticos de colesterol (Deis, 1997).

5.8 Recomendaciones diarias de fibra

La ingesta recomendada de fibra es 20-30 g/día y la Food and Drug Administration (FDA) recomienda que una dieta equilibrada para una persona sana debe tener una proporción de fibra insoluble de 70-75% y de fibra soluble 25-30%. El consumo diario de fibra en España se sitúa en torno a 22 g, mientras que en países en vías de desarrollo llega a 60 g (García y Velasco, 2007). También existe controversia sobre la cantidad de fibra recomendable, especialmente en lactantes y niños preescolares. No se aconsejan tasas altas, ya que se requiere una dieta con un elevado contenido energético y denso en nutrientes para atender a las necesidades de crecimiento. Parece que la inclusión de 9-10 g de fibra en la fórmula láctea de un lactante de 6 a 20 semanas de edad no afecta al ingreso necesario de calorías y nutrientes, para un adulto 20-35 g/día sería una cantidad óptima (Buchanan, 1999). Las recomendaciones alemanas, en 1991, establecieron 30 g/día (12.5 g/1000 calorías de la dieta). La British Nutrition Foundation, en 1990, se limitó a recomendar una dieta rica en hidratos de carbono complejos. El Departamento de Salud del Reino Unido propuso una cifra de 18 g de polisacáridos diarios distintos al almidón (Williams *et al.*, 1995; Department of Health, 1991).

5.9 Obtención industrial de fibra dietética

Los procesos de extracción de fibra en forma concentrada para su uso, en general, como ingrediente, parten de subproductos de otras operaciones alimentarias, como ocurre en el caso del salvado de trigo, la fibra de soya (salvado y el cotiledón) y la fibra de manzana, cítricos o pulpa de remolacha, por ejemplo, siendo las tres últimas una importante fuente de gran cantidad de sustancias pécticas. Los extractos y concentrados de fibra, dependiendo del proceso de extracción, tienen propiedades físicas y nutricionales diferentes a las del material originario puesto que las vitaminas, minerales

y los fitoquímicos se eliminan junto con la proteína, los lípidos y el almidón (Kar y Arslan, 1999).

La técnica más tradicional de extracción de fibra se centra en operaciones de molido de las distintas fuentes naturales de fibra. Este molido, en el caso de granos, separa el salvado del endospermo, dando lugar a un producto con menor cantidad de fibra insoluble y también de fibra total, ya que el salvado es rico en celulosa y lignina mientras que el endospermo contiene una mayor proporción de moléculas solubles en agua, principalmente en hemicelulosa. Este tratamiento físico no modifica las moléculas de fibra en cada subproducto, ya sea el salvado o la harina, por lo que las diferencias entre los distintos tipos de harinas se deben fundamentalmente a la cantidad de fibra sustraída durante el molido. Así mismo, la reducción del tamaño de partícula que ocurre como consecuencia de la molienda de los materiales utilizados para obtener fibras puede afectar la capacidad de retención de agua de acuerdo con la composición y el proceso previo que pudo tener la fibra antes de su molienda. Por ejemplo, el molido puede reducir la capacidad de retención de agua de una harina de salvado que previamente ha sido sometida a un proceso con vapor, por ejemplo en un escaldado, y con un posterior secado para la inactivación enzimática, pretratamientos que, de por sí, ya modifican la estructura celular (Córdova, 2005).

Por otra parte, las porciones más duras de los alimentos probablemente sean ricas en lignina y celulosa, las cuales son más resistentes al molido, mientras que las porciones menos duras pueden contener más almidón y otros polisacáridos solubles en agua. Estas fracciones a su vez tendrán diferentes propiedades de hidratación y, por lo tanto, distintas propiedades funcionales. Por ejemplo, las partículas más pequeñas obtenidas de una molienda empleando un molino de martillos en el salvado de trigo, la fibra de remolacha o la fibra de cítricos presentan menor capacidad tanto de retención de agua como de aumento de volumen. No obstante, la capacidad de retención de agua es mayor en las pequeñas partículas obtenidas de la cascarilla del guisante, lo que probablemente se deba al incremento del tamaño del poro inducido en la molienda de la cascarilla del guisante (Camire, 1999).

La extracción química, como la que se lleva a cabo para obtener gomas a partir de avena, implica un tratamiento del salvado de avena con una solución acuosa de carbonato de sodio (pH 10) a 40°C (Camire, 1999). Las propiedades de la fibra obtenida dependen, en este caso, de cómo se lleve a cabo el proceso de concentración de la fibra. En el caso de la pectina, actualmente se procede a una extracción por precipitación en alcohol. Para que este proceso sea eficiente el extracto de pectina, obtenido del calentamiento (60-100°C) de la piel de la fruta a un pH entre 1.5-3 en agua con ácido mineral, debe concentrarse, por lo que dicho proceso se lleva a cabo en evaporadores al vacío para evitar además la degradación térmica de la pectina (Belitz y Grosch, 1997). Este extracto puede ser mezclado directamente con un alcohol (isopropanol, etanol, o posiblemente metanol) o puede pasar por una etapa en la que se modifique el grado de esterificación antes de someter al proceso de precipitación (May, 1997).

5.10 Métodos analíticos para determinación de fibra

El análisis de la fibra alimentaria va encaminado al conocimiento e identificación de una forma exacta de cada uno de sus componentes y a su cuantificación, teniendo en cuenta el concepto fisiológico de la misma. La evolución metodológica abarca desde tratamientos sencillos, de aislamiento y posterior gravimetría, hasta aquellos que permiten identificar diferentes fracciones dentro de la fibra alimentaria, bien mediante colorimetría o bien por medio de técnicas cromatográficas (Rodríguez, 1993).

5.10.1 Métodos para la determinación de fibra bruta

El primer método para evaluar la fibra data de los primeros años del siglo XIX, aunque no hay acuerdo sobre la fecha exacta (Monte y Vaughan, 1982); se denomina método de Weende y el tratamiento de la muestra se realiza mediante un ataque secuencial con ácido (H_2SO_4) y álcali (NaOH) al 1.25% y al residuo insoluble obtenido por filtración se le denomina fibra bruta. Es el primer método que se conoce para el análisis de fibra, que en un primer momento se destinó al análisis de forrajes y posteriormente se aplicó al análisis de alimentos (Asp y Johansson, 1984). Williams y

Olmsted fundamentan que este método no valora un 40% de los carbohidratos no disponibles (Asp y Johansson, 1984); y en 1973 precisaron que un 80% de las hemicelulosas, un 60% de la lignina y un 50% de celulosa no se cuantifican (Van Soest y McQueen, 1973). Otros autores han señalado la gran diferencia cuantitativa que se produce al emplear un método de fibra bruta para evaluar la fibra alimentaria (Burdaspal *et al.*, 1980). Así pues los valores reales de lo que hoy día se entiende por fibra pueden ser unas cinco veces superiores a los valores de fibra bruta (Dreher, 1987).

5.10.2 Métodos detergentes

Van Soest inicia en 1963 la publicación de una serie de trabajos en los que propone el uso de soluciones detergentes a pH ácido y neutro para el análisis de fibra alimentaria. El método ácido detergente utiliza bromuro de cetil trimetil amonio en H_2SO_4 1 N y determina, en principio, celulosa y lignina. En el residuo de fibra ácido detergente (FAD) se estudia, de forma más detallada, el contenido de lignina y proteína en alimentos que han sido sometidos a varios procedimientos de calentamiento y desecación revelándose que el método es sensible frente al daño debido a las reacciones de pardeamiento no enzimático (Van Soest, 1963b).

A continuación tiene lugar el desarrollo del método neutro detergente en el que se utiliza como detergente a lauril sulfato sódico y se evalúa igualmente fibra insoluble, pero en este caso incluye, además de celulosa y lignina, también hemicelulosas (Van Soest y Wine, 1967). El reactivo lleva en su composición edetato sódico, agente complejante que permite la solubilización de sustancias pécticas (Belo y Lumen, 1981). Con el tiempo, el método neutro detergente ha resultado ser el mejor que existe para el análisis de fibra alimentaria en heces, dada su gran eficacia en la eliminación del nitrógeno proteico (Siavin y Marlett, 1983).

5.10.3 Métodos enzimáticos y gravimétricos

El tratamiento en este caso se hace sometiendo la muestra a la acción de enzimas que eliminan fundamentalmente almidón y proteína. Algunos de estos métodos evalúan la fibra alimentaria sin diferencias entre sus distintas fracciones: soluble e insoluble. Otros, sin embargo permiten realizar este tipo de fraccionamiento. Se han propuesto numerosos métodos enzimáticos que, con el paso del tiempo, han ido incluyendo enzimas de mayor eficacia. En la Tabla 4, se resume los principales métodos enzimático-gravimétricos y se detallan los tipos de enzimas utilizados por cada autor.

Tabla 4
Tipos de enzimas utilizados por cada autor

Métodos	Autor
McCance y Lawrence (1929)	Takadoastasa
Williams y Olmsted (1935)	Pancreatina
Weinstock y Benhan (1951)	Enzimas microbianas
Salo y Kotilainen (1970)	Pepsina o tripsina
Thomas (1975)	Pancreatina, Rhozyme
Hellendoorn (1975)	Pepsina y pancreatina
Elchalzy y Thomas (1976)	Amiloglucosidasa, tripsina
Furda (1977)	Amilasa de <i>B. subtilis</i> , proteasa
Schweizer y Würsh (1976)	Pepsina, pancreatina
Asp y Johanson (1981)	Pepsina, pancreatina
Asp y Johanson (1983)	Termamyl, pepsina, pancreatina
Meuser y col. (1983)	Amiloglucosidasa, Pancreatina/tripsina
Prosky y col. (1984)	Termamyl, <i>B. subtilis</i> , Amiloglucosidasa

Fuente: Rodríguez (1993).

Un avance en el desarrollo de los métodos enzimático-gravimétricos lo constituye el fraccionamiento en fibra insoluble y fibra soluble. Esto se logra tratando la muestra con enzimas, que varían según los métodos, y precipitando con etanol el filtrado que se obtiene al recoger el residuo de fibra insoluble (Furda, 1977; Schweizer y Wursch, 1979).

Los métodos enzimáticos desarrollados, trata de simular los cambios químicos, que le ocurren a los componentes de la fibra alimentaria en el tracto gastrointestinal humano. Los métodos enzimáticos utilizan enzimas obtenidas por biotecnología con una alta actividad para hidrolizar almidones, proteínas y lípidos que se encuentran formando la estructura de la fibra, conjuntamente con los polisacáridos indigeribles. Con estos métodos, se determina el material insoluble remanente al final del proceso de digestión enzimática. La aplicación de los métodos enzimáticos, presentan ciertas ventajas con respecto a los métodos químicos. En el método enzimático, no ocurre la pérdida de material fibroso por solubilización. Una diferencia importante, entre los métodos químicos que emplean detergentes biológicos y los métodos enzimáticos es que estos últimos, emplean enzimas específicas que hidrolizan y solubilizan los constituyentes no fibrosos, simulando un proceso fisiológico normal que puede ocurrir en el tracto gastrointestinal humano. Por lo cual, el valor estimado y las características de la fibra alimentaria probablemente, sea muy similar al obtenido del proceso digestivo normal. La metodología desarrollada por Prosky y colaboradores (García *et al.*, 2008) y sus posteriores modificaciones, fue de gran utilidad en este campo de investigación y es el método oficial de la Association of Oficial Analytical Chemists (A.O.A.C.).

5.10.4 Métodos de fraccionamiento

Este método permite un fraccionamiento de diferentes compuestos admitidos como fibra alimentaria. Este fraccionamiento específico no se había logrado hasta ese momento y va a ser la base conceptual de los métodos cromatográficos. El método permite el fraccionamiento en: polisacáridos solubles en agua, hemicelulosas, celulosa y lignina. Cada una de estas fracciones se cuantifica mediante colorimetría. Es un método

largo ya que requiere varios días para completarlo. Permite un grado limitado de fraccionamiento que deberá ser seguido por un análisis cuantitativo con métodos razonablemente específicos. Los resultados sugieren que las diferentes colorimetrías dan un análisis virtualmente completo para los carbohidratos no disponibles que tienen algún significado nutricional y en el campo de la química de los polisacáridos. Estos resultados están de acuerdo con estudios más detallados de paredes celulares de las plantas (Southgate, 1969).

5.11 Tratamientos para la extracción de fibra

5.11.1 Tratamiento con temperatura

Consiste en una serie de operaciones de acondicionamiento de la materia prima como previo al tratamiento de extracción, tales como el cortado, prensado, molienda y lavado. En el trabajo de investigación realizado para la obtención del concentrado de fibra de piña, se estudio la etapa de lavado con variables de relación de agua: residuo 2:1, temperatura de 100°C y con un tiempo de 5 minutos de tratamiento, resultando de este trabajo un rendimiento de 6.4 a 8.6% y con un contenido de fibra dietética total de 85.2%, constituida mayoritariamente por hemicelulosa en un 43.8% y la capacidad de retención de agua fue de 6.1 g/g de muestra seca (Fernández, 2006). Por otro lado, también se tiene al trabajo efectuado para la obtención del concentrado de fibra proveniente de hojas del *Agave tequila* Weber, en la que la fibra se trató a una temperatura de 90°C, relación de M:H₂O 1:2 y con un tiempo de 15 minutos, tratamiento considerado como el más adecuado para concentrar la mayor cantidad de fibra (García, *et al.*, 2003). Por último se cita el trabajo de investigación efectuada sobre las pencas de *Agave*, con la finalidad de obtener la fibra; estudiándose las variables de tiempo y la presión, mediante la ayuda del modelo estadístico matemático “superficie de respuesta”, evaluando las condiciones óptimas del tratamiento que permitan obtener el mayor porcentaje de fibra limpia y de color ideal; siendo esta a una presión de 45 lb/pulg² y con un tiempo de 63 minutos con un rendimiento óptimo de 9.08% (Barrios, 1982).

5.11.2 Tratamiento por explosión en vapor de agua

Se ha estudiado el efecto de un tratamiento termomecánico de explosión a vapor que tiene efectos sobre el complejo celulolítico, constituyéndose, como una operación de pretratamiento de la masa lignocelulósica que altera la compleja estructura de este tipo de materiales, facilitando así la acción de los enzimas celulolíticos (Aguilera y San Martín, 1985). En este tratamiento de explosión a vapor, la masa se somete durante tiempos cortos a una presión y temperatura elevada, produciéndose a continuación una descompresión brusca en el reactor mediante el cual se descarga el material. De esta manera, se produce una disgregación efectiva del material en sus tres componentes (celulosa, lignina y hemicelulosa). Este tipo de tratamiento se experimentó sobre residuos de extracción de aceite de oliva (pulpa y porciones de hueso), en una instalación piloto que fue equipada con un reactor de dos litros de capacidad diseñado para alcanzar una presión de operación máxima de $42 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$. El reactor se cargó con 200 g de materia prima y se inyectó vapor saturado hasta alcanzar la temperatura deseada. Una vez transcurrido el tiempo de proceso, el material se descargó de manera súbita en un ciclón, eliminándose los volátiles (Ballesteros *et al.*, 2002). El proceso de explosión a vapor puede ser usado satisfactoriamente como un pretratamiento para la producción del etanol a partir de la biomasa lignocelulosica. Tradicionalmente la efectividad del pretratamiento es evaluado en términos de solubilización de hemicelulosa, la conversión enzimática de la fracción de celulosa y la recuperación de ambos polisacáridos. En este estudio, se han evaluado diferentes parámetros de composición (componentes principales) teniendo como una alternativa para caracterizar el efecto del pretratamiento con el vapor de materiales lignocelulosico.

5.11.3 Tratamiento con soluciones químicas

Los residuos de agrícolas previa a la fermentación, debe ser sometido a una serie de procesos para liberar los azúcares: trituración o molienda, clasificación, pretratamiento, hidrólisis ácida y acondicionamiento. El proceso debe conseguir la ruptura de los enlaces $\beta(1,4)$ glucosídicos para obtener azúcares y evitar que éstos se degraden, a la vez que aparezcan otros compuestos indeseables. Mediante la hidrólisis

con ácidos se consigue romper la estructura cristalina de la celulosa y hemicelulosa, de forma que se liberan los azúcares que las forman obteniéndose una disolución azucarada (hidrolizado). La hidrólisis ácida puede realizarse con elevadas concentraciones de ácido, 70 a 77% en peso, por lo que no son necesarias temperaturas altas, próximas a 50°C, o bien a concentraciones bajas, 0.4 a 0.7% en peso, que sí necesita temperaturas altas, sobre 200°C. El proceso de hidrólisis se ha tratado de cuantificar mediante la determinación de los rendimientos en glucosa y en azúcares reductores totales, para cada uno de los hidrolizados obtenidos. Por otra parte, una vez finalizada la hidrólisis, cada uno de los residuos sólidos obtenidos se ha caracterizado en relación al contenido en celulosa, hemicelulosa, lignina y cenizas. En este sentido, cabe indicar que bajo la hipótesis de no degradación de la lignina se han calculado los valores de la conversión fraccional aceptando que la hemicelulosa es el reactivo limitante (Moya *et al.*, 2005).

También se han desarrollado muchos tratamientos para hacer los materiales lignocelulósicos más susceptibles a la sacarificación, que incluyen los tratamientos físicos, químicos y enzimáticos. Como tratamiento físico, la molienda disminuye el índice de cristalinidad y el grado de polimerización de la celulosa, aunque permite aumentar la superficie de contacto con reactivos y enzimas. De la misma manera, la molienda húmeda favorece la hidrólisis enzimática de la celulosa (Chang *et al.*, 1981).

5.12 Propiedades funcionales de la fibra

Actualmente, existe un gran interés en nuevas fuentes de fibra dietética en concentraciones comparables a las que se hallan en concentrados de subproductos de cereales y leguminosas; entre ellos el salvado de trigo, arroz, avena, lupino, etc. (Villarreal *et al.*, 2003). Por su parte, en numerosas investigaciones sobre propiedades funcionales de la fibra, está fundamentado básicamente en medir los siguientes parámetros:

- Capacidad de absorción
- Capacidad de retención de agua

- Capacidad de absorción de moléculas orgánicas
- Capacidad de intercambio catiónico y
- Capacidad de hinchamiento

Villarroel *et al.* (2003), estudió las propiedades funcionales de la fibra del musgo *Sphagnum magellanicum* y su utilización en la formulación de productos de panadería, en el que tuvo como variables de respuesta a la capacidad de absorción (CAA) y retención de agua (CRA), capacidad de absorción de moléculas orgánicas (CAMO), capacidad de hinchamiento (CH) y capacidad e intercambio catiónico (CIC), todos ellos en función al tamaño de partículas para medir su efecto sobre estas propiedades.

Zambrano *et al.* (2002), caracterizó fisicoquímicamente el contenido de fibra dietética total, fibras solubles y fibras insolubles; además de estudiar las propiedades funcionales tales como: capacidad de absorción, capacidad de retención de agua, capacidad de absorción de moléculas orgánicas y capacidad de intercambio catiónico, teniendo como patrón comparativo a la cascarilla de arroz.

Tamayo y Bermúdez (2002), estudiaron los residuos vegetales de la industria de jugo de naranja como fuente de fibra dietética, sobre el cual se evaluaron las propiedades funcionales expresadas en capacidad de hinchamiento, capacidad de absorción de agua y capacidad de adsorción de aceite. Los estudios se efectuaron sobre residuos de fibras lavadas y deshidratadas. Por su parte Baquero y Bermúdez (2002), estudió los mismos parámetros funcionales teniendo como materia prima los residuos vegetales (cáscara) de la industria del jugo de maracuyá como fuente de fibra dietética.

Tabla 5
Propiedades funcionales de diferentes alimentos (g/gM.S.)

Alimentos	CAA	CRA	CAG	Autor
Nopal Cascarilla de maíz	5.75 3.17	4.66 2.32	0.69 1.57	Zambrano y Hernandez (2002)
Avena Col	1.42 3.18	1.37 3.03	1.75 3.80	Zambrano y Gallardo (2002)
Albedo de naranja tratado a 90°C Albedo de naranja tratado a 80°C	7.65 8.23	n.d. n.d.	0.98 1.95	Tamayo y Bermúdez (2002)
Torta de maíz Fibra de maracuyá	10.51 8.70	n.d. n.d.	n.d. 1.50	Baquero y Bermúdez (2002)
Fibra de musgo <i>Sphagnum magellanicum</i>	36.00	34	23.68	Villarroel <i>et al.</i> (2003)

6. MÉTODOS

6.1 Campos de cultivo y toma de muestras

Las muestras (hojas del *Agave tequilana* Weber) utilizadas para la investigación fueron recolectadas en dos etapas: para las pruebas preliminares de los campos de cultivo ubicados en alrededores de Ciudad Victoria del estado de Tamaulipas y para la segunda etapa (pruebas definitivas), en el estado de Guanajuato cuyos campos de cultivo están ubicados en el municipio de Pénjamo, las cuales también son utilizadas para la fabricación del tequila. En ambos casos, se utilizó el criterio de muestreo a azar, de plantaciones realizadas en la misma fecha y de hojas que se encuentra a una determinada altura en los plántones, permitiendo que estas sean lo más homogéneo posible en sus características fisicoquímicas.

6.2 Descripción del diagrama de flujo general (Figura 3)

6.2.1 Acondicionamiento de hojas

En el laboratorio, las muestras de las hojas *Agave* se **seleccionaron**, en forma manual, descartando aquellas que se encuentren dañadas físicamente, ya sea por la mal formación fisiológica o durante la toma de muestra y el transporte.

La operación de **eliminación** de espinas (bordes) y la capa protectora llamada cutícula (superficie externa) se efectuó en forma manual mediante el uso de un cuchillo y guantes de asbesto para evitar posibles cortes en las manos. Es importante dejar libre de cutícula, puesto que en esta superficie se encuentra la mayor cantidad de pigmentos de coloración verde (clorofila) las que imparte el color oscuro al producto final de la fibra.

6.2.2 Operaciones de Pretratamiento

Se realizan sobre las hojas libres de cutícula, todas ellas orientadas para facilitar la extracción de la fibra propiciando una mayor superficie de contacto con el medio de extracción. Una de ellas es el *cortado* en forma manual mediante el uso del cuchillo en cubos de aproximadamente un centímetro de arista. Posteriormente, el producto es *triturado* mediante el uso de un equipo eléctrico provisto de cuchillas de acero inoxidable, que al girar a altas revoluciones por minuto, incrementa sustancialmente la superficie libre de la fibra.

6.2.3 Extracción

Es una de las operaciones muy importante del presente trabajo de investigación (Figura 3). Para ello, se propuso tres métodos de tratamiento para la extracción de la fibra del *Agave* todas orientadas con el objetivo de incrementar la concentración de la FND además de modificar las propiedades funcionales de la fibra que vienen a ser las variables de respuesta del presente trabajo de investigación.

El método I (MI) se toma como referencia, cuyas variables de operación fueron estandarizadas por García *et al.* (2003), fundamentado en el uso del agua como un vehículo para remover los compuestos solubles no deseables para incrementar la concentración de la fibra. Los valores de las variables de este método son la temperatura de la solución a 90°C; el tiempo de tratamiento de 15 minutos y la relación de M:H₂O de 1:2 p/v., que fueron replicados en el presente trabajo.

La extracción por el **método II**, se propuso como una modificación al primero, y que se fundamenta en el uso de variables físico mecánicas tal como la presión de vapor de agua por encima a la presión atmosférica (P), el tiempo de tratamiento (t) y la relación de M:H₂O (R). Los valores de las variables en estudio fueron la presión (kg_f/cm²) con niveles de: 0.5, 0.75 y 1.0; el tiempo (min) con niveles de: 5, 10 y 15; y la relación M:H₂O (p/v) con niveles de 1:2 y 1:3.

Para el **método III**, se propuso un tratamiento fundamentado en el uso de variables fisicoquímicas, tal como la concentración de la solución de ácido clorhídrico [N], la temperatura (T) y el tiempo de tratamiento (t). Los valores de las variables en estudio fueron la concentración del HCl (N): 0.1 y 0.4; tiempo de tratamiento (min): 5, 10 y 15; y la temperatura (°C): 70, 80 y 90°C.

El número de tratamientos para los dos últimos métodos es el resultado de la combinación de los factores en sus diferentes niveles, resultando 18 tratamientos para cada uno con tres repeticiones. En esta misma etapa se efectuaron operaciones adicionales en todos los casos, tal como el filtrado en una malla para eliminar la solución acuosa (liquido), y un enjuague con agua destilada para cada caso.

6.2.4 Deshidratado

Esta operación tuvo como objetivo de eliminar la totalidad del agua que quedó en la fibra después del tratamiento de extracción; además de otros componentes volátiles. El equipo utilizado para esta operación fue la estufa de aire forzado provistos de charolas e identificadas cada uno de acuerdo a los tratamientos del que proceden a una temperatura de 70°C por un tiempo de 12 horas.

6.2.5 Pulverizado

La operación se realizó con la finalidad de reducir el tamaño de partículas, en un molino (Cyclotec), equipo con diseño característico para muestras como la fibra que presentan una alta resistencia. El principio de la reducción del tamaño, es mediante el uso de aspas metálicas que giran a altas revoluciones sobre su propio eje y que la fibra es sometida con una fuerza de cizalla sobre una superficie vertical áspera, logrando reducir el tamaño de partículas eficientemente. El diámetro de la abertura de la malla fue de 500 μm .

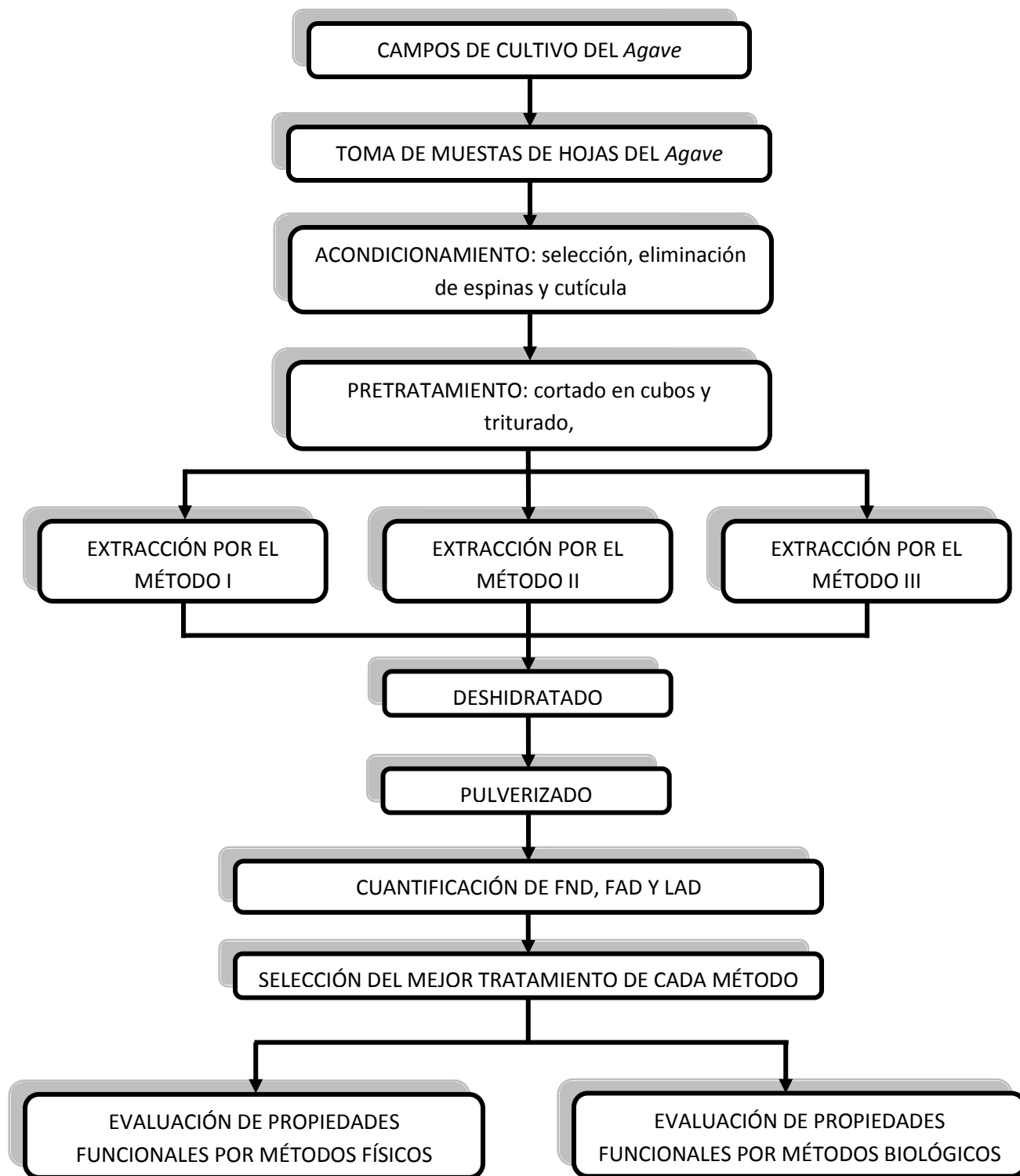


Figura 3. Diagrama de flujo general del proceso de experimentación

6.2.6 Cuantificación de fibra neutro detergente (FND)

Para determinar la FND se utilizó el método desarrollado en los años sesenta por Van Soest, el que permite cuantificar el grupo de fibras insolubles compuestos por celulosa, hemicelulosa y lignina a una solución de pH neutro (Tejada, 1992).

Tabla 6
Composición de reactivos para solución neutro detergente

Reactivos	Cantidad
Agua destilada	1.00 litro
Sulfato lauril sódico	30.00 gramos
Acido etilendiaminotetracético (EDTA)	14.61 gramos
Hidróxido de sodio (NaOH)	4.00 gramos
Tetraborato de sodio decahidratado ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$)	6.81 gramos
Fosfato disódico anhidro (Na_2HPO_4)	4.56 gramos
Etileno glicol éter monoetílico	10.00 mililitros

Para preparar la solución en base a un litro de agua destilada (Tabla 6), el hidróxido de sodio es disuelto en 150 ml de agua destilada para luego agregar el EDTA y el $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 10 hidratado. Paralelamente en otro vaso, se preparó (disolver) calentando el Na_2HPO_4 en 20 ml de agua destilada. Estas dos soluciones son mezcladas mientras estén calientes. Por otro lado, el sulfato lauril sódico es disuelto en alrededor de 200 ml de agua destilada, para luego agregar a un frasco por medio de un embudo que tiene en el tallo un tubo de látex de manera que se llegue al fondo. Finalmente se completa esta primera etapa con la adición del etileno glicol éter monoetílico para evitar la espuma y el agua restante hasta un litro. Al día siguiente, se midió el pH, el que debe estar entre 6.9 y 7.1, de lo contrario se debe ajustar con NaOH o HCl (ANKOM, 2008).

Para proceder con la determinación de FND, las muestras de fibra deben estar completamente deshidratadas y reducidas de tamaño en un molino con malla de 500

micras. Las bolsas de filtración F57-ANKOM, son codificadas mediante el uso de un marcador resistente a solventes, luego pesadas en balanza analítica, registrando el peso como W_1 . Pesar 0.45 a 0.55 gramos de muestra dentro de la bolsa de filtración registrándose como W_2 (peso de la muestra). Las bolsas son selladas térmicamente del borde. Paralelamente por cada lote experimental, es incluida una bolsa de filtración vacía como blanco registrándose con el peso C_1 . Las bolsas, son colocadas en el contenedor del digestor de fibra ANKOM²⁰⁰, diseñado para 24 muestras por lote. Luego se añade 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 procede la digestión a una temperatura de $100 \pm 0.5^\circ\text{C}$, por un tiempo de 75 minutos. Terminada esta operación se lava hasta por tres veces con agua destilada a una temperatura de 70 a 90°C en el mismo equipo. Una vez extraída las bolsas se lava con acetona por un tiempo de 3 a 5 minutos. Llevar a la estufa a $102 \pm 2^\circ\text{C}$ por un tiempo de 2 a 4 horas, transcurrido este tiempo, pesar y registrar como W_3 .

La ecuación que permite estimar el porcentaje de FND es:

$$\% \text{ FND} = \frac{(W_3 - W_1 \times C_1)}{W_2} \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

C_1 , es la relación entre el peso inicial de bolsa y el peso final del blanco en ambos casos.

6.2.7 Cuantificación de fibra ácido detergente

La estimación del contenido de fibra ácido detergente, fue efectuada de acuerdo al procedimiento descrito por Van Soest *et al.*, (1991), que se fundamenta en el uso de una solución ácido detergente preparada a base de bromuro de cetyl trimetil amonio (CTAB), disuelto en ácido sulfúrico a una concentración de 0.98 a 1.02 N.

El proceso consistió en la digestión de las muestras (fibra de *Agave*) mediante el uso del equipo de ANKOM²⁰⁰, con una solución ácido detergente, por un tiempo de 60 minutos a una temperatura de 100°C; para lo cual las muestras fueron cerradas herméticamente en bolsas de filtro. Una vez terminado el proceso de digestión, las bolsas fueron lavadas con agua caliente (70 - 80°C), seguido del lavado con acetona, luego secado. El remanente de la digestión fue cuantificado como la cantidad de hemicelulosa y lignina, para lo que se utilizó la siguiente ecuación:

$$\% FAD = \frac{(W_3 - W_1 \times C_1)}{W_2} \times 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

W1: Es el peso de bolsa de filtro.

W2: Es el peso de la muestra.

W3: Es el peso de la bolsa y la muestra seca después de la digestión.

C1: Es la relación del peso final y la inicial de la bolsa de filtración.

Fuente: ANKOM (2008).

6.2.8 Cuantificación de lignina ácido detergente

Para la cuantificación de lignina, se utilizó el método descrito por Tejada (1992), cuyo fundamento está basado en el uso de una solución de ácido sulfúrico de alta concentración. En este proceso, las muestras provienen del residuo de la digestión de fibra ácido detergente (celulosa y lignina); los que son sometidos a la digestión en la solución de ácido sulfúrico al 72%, por un tiempo de tres horas, luego son lavadas hasta obtener un pH neutro, además del uso de la acetona, deshidratado e incinerado a una temperatura de 525°C.

La diferencia del remanente de la digestión y el peso residual de la incineración, fue cuantificada como la cantidad de lignina, para la que se utilizó la siguiente ecuación:

$$\% LAD = \frac{L}{S} \times 100 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

LAD: es la lignina acido detergente

L: Pérdida por ignición, después del tratamiento con H₂SO₄ al 72%

S: Peso de la muestra

Fuente: Tejada (1992).

6.2.9 Selección de tratamiento

Para la selección de un tratamiento por cada método, los resultados de FND, fueron sometidos a análisis estadísticos como el ANOVA y la comparación múltiple de medias mediante el uso del programa SPSS versión 15, además de los criterios adicionales tal como la economía del proceso.

6.2.10 Evaluación de propiedades funcionales por métodos físicos

Las propiedades funcionales de la fibra, se determinaron de acuerdo a la referencia reportada en diferentes trabajos de investigación.

a. Capacidad de absorción de agua: Se determinó colocando 0.5 gramos fibra extraída, deshidratada y pulverizada en un tubo de base cónica, luego se adicionó un exceso de agua (5 ml) y se pesó. Se mezcló la muestra con un agitador Vortex por 30 minutos. Fue centrifugada durante 10 minutos a 3000 rpm. Se retiró el sobrenadante y se pesó el sedimento. Los resultados se expresan en gramos de agua por gramo de muestra

(Tamayo y Bermúdez, 2002). Por relaciones matemáticas; los resultados se expresan en gramos de agua absorbida por gramo de materia seca.

b. Capacidad de retención de agua: Se utilizó el método citado por Zambrano *et al.* (2002), que consiste en colocar 2 gramos de muestra de tamaño de partículas uniforme en un tubo de base cónica para luego agregar un exceso de agua (5ml) y mezclar con el agitador Vortex. Se dejó en reposo por un tiempo de 24 horas y se centrifugó a 2000 gravedades por 15 minutos. Por relaciones matemáticas; los resultados se expresan en gramos de agua absorbida por gramo de materia seca.

c. Capacidad de adsorción de aceite: Se determina en forma similar a la capacidad de absorción de agua, reemplazando aceite en lugar de agua; los resultados se expresan como gramos de aceite adsorbida por gramo de muestra seca (Tamayo y Bermúdez, 2002).

6.3 Evaluación de propiedades funcionales por métodos biológicos

6.3.1 De los animales de experimentación

Los estudios se realizaron de acuerdo a las directivas establecidas en la Norma Oficial Mexicana NOM-062-ZOO-1999, especificaciones técnicas para la producción, cuidado y uso de los animales de laboratorio. Las ratas machos albinas de cepa Wistar fueron reproducidas en el bioterio de la Facultad de Ciencias Biológicas del Departamento de Alimentos y al momento del experimento se seleccionaron aquellos que tuvieron un peso entre 150 ± 10 g de un promedio de 60 días de nacidas, además mediante la ayuda del programa estadístico de SPSS se evaluó los ocho subgrupos para verificar las diferencias entre ellos y asegurar la homogeneidad de las mismas en cuanto al peso.

Los animales seleccionados se alojaron tanto en la fase de adaptación y experimentación en jaulas individuales diseñadas de tal forma que evite al máximo la pérdida de los alimentos, al igual que los comederos. La distribución se observa en la

Tabla 7. La fase de adaptación fue de tres días y al cuarto día se inició con los experimentos, periodos en los que la temperatura fue acondicionada a 22 a 24°C y con un ciclo de luz-oscuridad de 12 horas (Peter *et al.*, 1980). Al cuarto día se inició con suministrar los alimentos objeto del estudio y agua *ad libitum* hasta por un periodo de 10 días consecutivos.

Tabla 7.
Distribución de animales de experimentación en jaulas individuales

Tratamientos	Grupo 0		Grupo I		Grupo II		Grupo III	
	5%	10%	5%	10%	5%	10%	5%	10%
1	J-1	J-6	J-11	J-16	J-21	J-26	J-31	J-36
2	J-2	J-7	J-12	J-17	J-22	J-227	J-32	J-37
3	J-3	J-8	J-13	J-18	J-23	J-28	J-33	J-38
4	J-4	J-9	J-14	J-19	J-24	J-29	J-34	J-39
5	J-5	J-10	J-15	J-20	J-25	J-30	J-35	J-40

6.3.2 De la preparación y análisis de las raciones de alimento

La totalidad de los insumos fueron adquiridos de la compañía Bioselec S.A. de CV., siendo éstas tal como la caseína de alto contenido de nitrógeno, aceite de maíz, alfa celulosa, almidón de maíz, mezcla de vitaminas y mezcla de minerales cuya formulación se observa en la Tabla 8, además de las especificaciones técnicas que se encuentran en los anexos 1 al 6.

Se formularon dietas para cuatro grupos y cada uno subdividido en dos, haciendo un total de ocho formulaciones. En el primer grupo (grupo 0) fue incluida alfa celulosa, considerada como fibra comercial al 5 y 10% de inclusión. En el resto de grupos (grupos I, II y III) se incluyó la fibra extraída de las hojas de *Agave* por los métodos I, II y III, al 5 y 10 % respectivamente. La incorporación de la fibra en estudio, se hizo bajo expensas del almidón de maíz, permaneciendo constante los insumos restantes.

Tabla 8
Formulación de dietas para ensayos biológicos

Componentes	Cantidad (g/100 g)							
	Fibra comercial		Fibra extraída por el método I		Fibra extraída por el método II		Fibra extraída por el método III	
	5%	10%	5%	10%	5%	10%	5%	10%
Carbohidratos (almidón de maíz)	60	55	60	55	60	55	60	55
Proteína (caseína)	20	20	20	20	20	20	20	20
Grasa (aceite de maíz)	10	10	10	10	10	10	10	10
Mezcla de minerales	4	4	4	4	4	4	4	4
Mezcla de vitaminas	1	1	1	1	1	1	1	1
Fibra	5	10	5	10	5	10	5	10
Total	100	100	100	100	100	100	100	100

Fuente: Elaboración Propia, con referencia de Hernández (2003).

La presentación de los alimentos fueron en forma de pellets preparados en el laboratorio de procesamiento de alimentos, para lo que fue necesario realizar las operaciones de: *pesado* de ingredientes, *mezclado* en seco, *adición* de agua, *amasado*, *peletizado*, *secado* y *envasado*. Sobre los alimentos elaborados, distribuidos en cuatro grupos de 5 y 10%, fueron efectuados el análisis proximal de los siguientes componentes: humedad, proteína, grasa (extracto etéreo), carbohidratos (por diferencia), fibra dietética y ceniza (AOAC, 2002).

6.3.3 De las variables en estudio

6.3.3.1 Peso de las heces

Las heces excretadas fueron recolectadas al día siguiente de haber suministrado el alimento, en un horario establecido (9 a 10 am). Las del primer día no fueron

consideradas como parte del experimento, puesto que estas presentaron fracciones del alimento previo al estudio. Las heces recolectadas de cada unidad experimental fueron pesadas, luego deshidratadas a una temperatura de 70°C, por un tiempo de 12 horas y pesadas nuevamente. En ambos casos se utilizó una balanza electrónica (OHAUS) de precisión en gramos con dos decimales. Una vez pesadas, fueron envasadas en frascos debidamente etiquetadas acumulando hasta el octavo día del experimento.

6.3.3.2 Volumen aparente de las heces

Sobre las heces recolectadas durante el periodo de experimentación, fueron determinado el *volumen aparente* mediante el uso de un tubo cónico graduado volumétricamente en el que incluye los poros y los espacios vacíos entre partículas; fundamento que está relacionado con el método para medir la densidad aparente (densidad a granel) de los alimentos (Singh, 1998).

6.3.3.3 Grasa en las heces excretadas

La cantidad de grasa en heces excretadas o también llamado extracto etéreo, se determinó mediante el uso del equipo Goldfish siguiendo el método AOAC (2002), que consiste en el uso de un solvente tal como el éter de petróleo. Para ello, los vasos Goldfish son secados en estufa a 100-105°C por 5 horas (hasta un peso constante), luego retirados al desecador hasta enfriar a temperatura ambiente y pesadas. Por otro lado, de 2 a 3 gramos de muestra previamente deshidratadas y homogenizadas, son envueltas en papel y colocadas en dedales y portadedales. Luego los portadedales son colocados en el equipo Goldfish. En los vasos se agregan 40 ml de solvente, son conectados al equipo asegurando que estén bien tapados. Es activado el flujo de agua como refrigerante y encendido las parrillas de calefacción. El tiempo de esta operación es de 4 horas y en seguida se retira el vaso conteniendo la grasa extraída y el solvente; este último es evaporado en la estufa a una temperatura de 100-105°C por 2 horas. La relación que permite calcular el porcentaje de grasa en las muestras es:

$$\% \text{ grasa (b.s.)} = \frac{W_3 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

W_1 , es el peso de la muestras (heces excretadas)

W_2 , Es peso del vaso Goldfisch

W_3 , es el peso del vaso Goldfisch mas la grasa extraída.

6.3.3.4 Tiempo de tránsito intestinal

El ensayo se efectuó como la continuación de los tratamientos anteriores (el día noveno y décimo), para ello se incluyó en los alimentos (pellets) un marcador (colorante) que permitió determinar este parámetro.

Junto a los parámetros citados anteriormente, se registraron los datos como el alimento proporcionado, alimento sobrante, alimento consumido (por diferencia entre el proporcionado y sobrante) y el peso corporal de las ratas.

6.4 Diseño estadístico

En la primera etapa, que corresponde a tres métodos de extracción de la fibra, se utilizó un diseño factorial con dos y tres niveles cada factor y con tres repeticiones cada tratamiento. Sobre los valores de los resultados de la variable de respuesta (FND) en forma independiente por cada método, se efectuó un análisis de varianza (ANOVA) para inferir la influencia de los factores y la interacción de los mismos. Posteriormente se determinó la comparación múltiple de medias para identificar la diferencia entre los tratamientos por cada método (Foroughbakhch, 2001). Para ambos casos se utilizó el programa de SPSS versión 15. Estos mismos criterios se utilizaron para evaluar los resultados de las propiedades funcionales obtenidas por métodos físicos y biológicos.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Extracción de fibra por diferentes métodos

7.1.1 Tratamiento por el método I (referencia)

Los resultados que se presentan en la Tabla 9, provienen de una réplica de la operación con variables estandarizadas, identificado en un estudio previo para concentrar la mayor cantidad de FND. El trabajo fue realizado por García *et al.* (2003); en el que el porcentaje de FND alcanzó el 41%; similar al valor obtenido en el presente trabajo que fue de 39.71% en base seca. Bajo similares condiciones (100°C, 5 minutos, 1:2 de relación M:H₂O), se trabajó con el residuo prensado de piña, obteniéndose como resultado de 81.6% de FND (Fernández *et al.*, 2006) valor que es ampliamente superior al producto en estudio.

Tabla 9
Valor de FND (b.s.) extraídos por método I

TRATA MIENTOS	Parámetros: T(°C), t(min), R(M:H ₂ O)	% FND*
1	90, 15, 1:2	39.71 ±1.37

* Media ± Desviación estándar, n=3.

7.1.2 Tratamiento por el método II (presión de vapor de agua)

En la Tabla 10, se observa los resultados de FND, que proviene de la combinación de tres factores en estudio, valores que varían desde 29.96% hasta 53.63% dependiendo de las condiciones de las variables. Efectuando el ANOVA multifactorial, se encontró que la relación de M:H₂O, es el único factor que no tiene influencia

significativa sobre las medias de FND; no siendo así en los dos factores adicionales tal como la presión y tiempo, cuya combinación en todos los casos, sí tiene una influencia significativa sobre las medias del FND ($p < 0.01$); por lo que es necesario considerar estos dos factores para estudios adicionales así como el requerimiento de energía.

El efecto de la presión de vapor que se genera durante la operación de extracción, se convierte fundamentalmente en un tratamiento termomecánico que permite desintegrar en forma parcial la compleja estructura lignocelulósica de la fibra, facilitando el mayor contacto posible con el agua para remover sustancias solubles (Moya, 2005) tal como las gomas, pectinas, almidones, clorofila y demás elementos que tienden a repeler el agua (Fernández, 2004), favoreciendo esto el tiempo de tratamiento. La temperatura es una variable que depende directamente de la presión, convirtiéndose así en un tratamiento en un tratamiento térmico que también tiene efectos sobre el contenido de fibra dietética de los alimentos ya que se señala que la cocción promueve el rompimiento de sus componentes (celulosa, hemicelulosa, lignina, pectina, gomas), además de propiciar la interacción y enlace de estas sustancias con proteínas y lípidos, así como la generación de cambios cualitativos y/o cuantitativos sustanciales que varían la composición total de la fibra (Carnvale y Lintas, 1995).

A pesar del resultado estadístico no significativo, la relación de M:H₂O, tiene un efecto importante sobre los valores de FND, tal como se puede apreciar en los resultados de la Tabla 10, en caso del incremento de la proporción del agua, estos valores tienden a bajar en todos los casos; efecto puede ser atribuido a la presencia de las regiones amorfas en las moléculas de la celulosa y hemicelulosa (Badui, 2006), las que con una alta proporción de agua pueden ser removidos, sobre todo la fracción de hemicelulosa de bajo peso molecular que presenta un carácter soluble en el agua.

Tabla 10
Valor de FND (b.s.) extraídos por método II

TRATA MIENTOS	P(kg _f /cm ²), t(min), R(M:H ₂ O)	% FND*
1	0.5, 5, 1:2	40.97 ± 2.00 ^{bc}
2	0.5, 10, 1:2	29.96 ± 1.82 ^a
3	0.5, 15, 1:2	42.23 ± 0.51 ^{bcd}
4	0.75, 5, 1:2	47.02 ± 4.00 ^{cde}
5	0.75, 10, 1:2	48.91 ± 2.90 ^{de}
6	0.75, 15, 1:2	47.95 ± 1.23 ^{cde}
7	1, 5, 1:2	47.19 ± 1.88 ^{cde}
8	1, 10, 1:2	45.75 ± 3.84 ^{bcd}
9	1, 15, 1:2	53.68 ± 0.25 ^e
10	0.5, 5, 1:3	46.74 ± 1.40 ^{cde}
11	0.5, 10, 1:3	48.80 ± 4.98 ^{de}
12	0.5, 15, 1:3	40.74 ± 0.63 ^{bc}
13	0.75, 5, 1:3	38.77 ± 1.65 ^b
14	0.75, 10, 1:3	43.80 ± 1.34 ^{bcd}
15	0.75, 15, 1:3	45.21 ± 0.66 ^{bcd}
16	1, 5, 1:3	45.81 ± 0.46 ^{bcd}
17	1, 10, 1:3	43.20 ± 4.73 ^{bcd}
18	1, 15, 1:3	43.32 ± 1.41 ^{bcd}

* Media ± Desviación estándar, n=3.

Para la selección de un tratamiento en función a la concentración de FND, se efectuó la comparación múltiple de medias (prueba de Tukey), reportándose como resultado, que el valor más alto (53.68%), no presenta diferencia significativa con valores de otros seis tratamientos; siendo insuficiente esta información para tomar una decisión hacia la selección de este método. Por consiguiente, se consideró el criterio adicional de requerimiento de energía necesaria para llevar a cabo los diferentes tratamientos a diferentes presiones con la ayuda de datos obtenidos de Hayes (1992); resultados que se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11
Requerimientos de energía para los tratamientos de extracción por MII

Incrementos de presiones (en 5 kg de agua)	Cantidad de energía necesaria (kJ)	Combustible requerido gas natural (m³)	% de Incremento
De presión atmosférica a 0.5 kg _f /cm ²	1700.63	0.050	-
De presión atmosférica a 0.75 kg _f /cm ²	1719.63	0.053	6%
De presión atmosférica a 1.0 kg _f /cm ²	1736.62	0.055	10%

Los cálculos se efectuaron sobre la base de 5 kg de agua, cantidad utilizada para tratar el lote de 1 kg. de materia; además asumiendo el valor de la capacidad calorífica promedio de 4.18 kJ/kg°C. Por otra parte, como fuente de energía utilizada se asumió el gas natural (metano) con un poder calorífico de 50010 kJ/kg, y la densidad de 0.6741 kg/m³. Para lograr una presión de 0.5 kg_f/cm², se requirió 0.050 m³ de gas natural, y para lograr el incremento hasta 0.75 y 1.0 kg_f/cm², se requiere una cantidad adicional de energía en el orden de 6 y 10% respectivamente, lo que traducido en términos económicos tiene una influencia significativa para la selección del tratamiento más adecuado. Por consiguiente, para este método de extracción, se seleccionó el tratamiento 10, con las variables de 0.5 kg_f/cm² de presión, con 5 minutos de tiempo y 1:3 de relación de M:H₂O p/v, condiciones de tratamiento que requiere menor cantidad de energía dentro del grupo con un valor de 46.74% de FND.

7.1.3 Tratamiento por el método III (solución ácida)

En la Tabla 12; se observan los valores de FND que provienen de diferentes tratamientos como resultado de la combinación de tres factores (temperatura, tiempo y la concentración de ácido). Los valores del FND tienen un rango de variación desde 55.50 hasta 70.94%, siendo el valor más alto el tratamiento 9, cuyos parámetros de las variables son de 90°C, 15 minutos y 0.1N. Se observa también que cuando las condiciones del medio son más drásticas en cuanto a la concentración y temperatura, la

fracción de FND tiende a reducir notablemente, tal como en el tratamiento 17 con solo 55.50%. Esta tendencia a la reducción, indica una posible hidrólisis de la celulosa y hemicelulosa (Fennema, 1993), la que da como producto a unidades moleculares de glucosa (azúcar solubles) y xilosa principalmente (Moya *et al.* 2005), siendo eliminadas éstas al momento de filtración y lavado, con lo que se reduce significativamente el porcentaje de FND.

Para medir el efecto de cada uno los factores en estudio, los resultados se analizaron estadísticamente mediante el ANOVA, en donde el tiempo (t) como un factor independiente no tiene influencia significativa ($p > 0.05$) sobre las medias del FND, al igual que las combinaciones de [N]xt, Txt y Ttxt[N]; sin embargo, los factores de [N] y la T, tiene una alta significancia ($p < 0.01$) sobre las medias de FND, al igual que la combinación entre el [N]xT.

En estudios anteriores, el procesos de extracción de fibras vegetales mediante el empleo de soluciones ácidas se utilizó principalmente con el objetivo de efectuar la hidrólisis de la celulosa para obtener azúcares sencillos con distintos fines, tal como el trabajo realizado por Ferrer *et al.* (2002), en el que trata el bagacillo de caña de azúcar a los diferentes parámetros ([H₂SO₄]: 2, 4, 6 y 8% de v/v; tiempo: 4, 8 y 12 horas y relación M:H₂O 30:1 v/v). Sin embargo, el objetivo del presente trabajo es lograr concentrar la mayor cantidad posible de la fibra, sin que tenga efectos en la reducción del rendimiento por efectos de la hidrólisis, por el que fue necesario optar por concentraciones más bajo del ácido, temperaturas cercanas a la de ebullición y un tiempo muy reducido de tratamiento.

En otro trabajo de investigación efectuado por Moya *et al.* (2005); se utilizó como materia prima el residuo de la poda de olivo, teniendo como objetivo hidrolizar la celulosa y hemicelulosa en azúcares sencillos, bajo las condiciones de 90°C de temperatura, entre 0,1 y 1,0 N de concentración de ácido clorhídrico y 240 minutos de tiempo de tratamiento, consiguiendo así romper la estructura cristalina de la celulosa y hemicelulosa; principio que fue utilizado para el presente trabajo, pero a condiciones

menos drásticas, en cuanto a la concentración del ácido, el tiempo y la temperatura de tratamiento, con la finalidad de romper los enlaces de las cadenas lineales intermoleculares unidas por puentes de hidrógeno con los grupos OH laterales en el caso de celulosa (Badui, 2006); permitiendo más que concentrar la fibra, modificar las propiedades de ésta.

Tabla 12
Valor de FND (b.s.) extraídos por método III

TRATA MIENTOS	T(°C), t(min), [N]	% FND*
1	70, 5, 0.1	65.14 ± 6.70 ^{cde}
2	70, 10, 0.1	68.60 ± 1.20 ^e
3	70, 15, 0.1	68.97 ± 0.77 ^e
4	80, 5, 0.1	67.87 ± 7.45 ^{de}
5	80, 10, 0.1	66.63 ± 2.61 ^{de}
6	80, 15, 0.1	67.60 ± 1.79 ^{de}
7	90, 5, 0.1	66.95 ± 2.47 ^{de}
8	90, 10, 0.1	67.63 ± 0.74 ^{de}
9	90, 15, 0.1	70.94 ± 1.44 ^e
10	70, 5, 0.4	66.60 ± 2.13 ^{de}
11	70, 10, 0.4	64.19 ± 1.49 ^{bcd}
12	70, 15, 0.4	67.17 ± 1.02 ^{de}
13	80, 5, 0.4	63.93 ± 0.54 ^{abcde}
14	80, 10, 0.4	62.68 ± 2.45 ^{abcde}
15	80, 15, 0.4	59.31 ± 0.85 ^{abcd}
16	90, 5, 0.4	56.04 ± 0.80 ^{ab}
17	90, 10, 0.4	55.50 ± 1.84 ^a
18	90, 15, 0.4	57.74 ± 1.05 ^{abc}

* Media ± Desviación estándar, n=3.

Efectuado la comparación múltiple de medias, se identificó que éstas se distribuyen en cinco grupos diferentes, siendo el tratamiento 9 con el FND más alto (70.94%), valor que no difiere significativamente con otras medias de catorce tratamientos. Al no encontrar diferencia significativa con un $\alpha=0.05$, se utilizó los mismos criterios para el MII.

Tabla 13
Requerimientos de energía para los tratamientos de extracción por MIII

Incremento de temperatura (en 5 kg de agua)	Cantidad de energía necesaria (kJ)	Combustible requerido gas natural (m³)	% de Incremento
De 30°C a 70°C	836.00	0.0248	-
De 30°C a 80°C	1045.00	0.0310	25%
De 30°C a 90°C	1254.00	0.0372	50%

Los cálculos teóricos reportan que para incrementar la temperatura de 70°C a 80°C, se requiere 25% más en volumen de combustible y de 70°C a 90°C, se requiere 50% más de combustible. Por consiguiente el factor del requerimiento de energía, es muy importante y con mayor razón si el tiempo de tratamiento se prolonga por mayores periodos. Otro factor muy importante a tomar en cuenta fue la concentración del ácido, que además de su costo, es necesario optar por las concentraciones más bajas, en razón de que son más fáciles de tratar las aguas residuales, y afectando en menor proporción a la problemática de la contaminación (Dávila, 1984). Estos dos criterios están relacionados directamente con el factor de economía del proceso, siendo entonces un criterio válido para la selección del tratamiento que implica bajas temperaturas y menores concentraciones de ácido, el que está dado por el tratamiento uno (70°C, 5 minutos, 0.1 N), con 65.14% de FND, valor que no presenta diferencia significativa con el más alto del grupo.

7.2 Propiedades funcionales de la fibra por métodos físicos

De los tratamientos seleccionados en cada método mediante el uso de diferentes criterios (primera etapa); sobre las fibras tratadas, deshidratadas y pulverizadas, fueron evaluadas las propiedades funcionales por métodos físicos, tal como la capacidad de absorción de agua (CAA), capacidad de retención de agua (CRA) y la capacidad de adsorción de aceite (CAG), parámetros considerados como una técnica para valorar indirectamente la importancia de la fibra como alimento funcional.

Estos parámetros dependerán directamente de dos factores; la primera de la organización física de los componentes de la fibra insoluble, entre ellos la presencia de las regiones amorfas y cristalinas (Badui, 2006), y por otro lado de las fracciones de celulosa, hemicelulosa y la lignina (fibras insolubles), que en forma independiente presentan propiedades físicas distintas relacionados con la capacidad de interactuar con el agua y otros compuestos (Fennema, 1993).

Para una mejor explicación del comportamiento de las propiedades funcionales por métodos físicos y bioensayos, se cuantificó la fracción de los tres componentes de las fibras insolubles compuestos por celulosa, hemicelulosa y lignina; resultados que se presentan en la Tabla 14. La fracción de celulosa para el MI contiene el 30.34%, siendo ligeramente mayor esta cantidad para el MII (tratamiento con presión) 36.80% y para el MIII (tratamiento con ácido) a 43.48%. Para el caso de la hemicelulosa, el MII es la que presenta mayor proporción de este componente con 12.11%, seguido del MI con 11.24% y reduciéndose considerablemente para el MIII a 9.25%. Por último, la lignina es la que presenta mayor estabilidad sobre los diferentes tratamiento aplicados, con valores de 3.40, 3.08 y 4.37% para MI, MII y MIII respectivamente; confirmando su alta resistencia por el que es considerado como un compuesto recalcitrante (Boudet *et al.*, 2003).

Tabla 14
Fracción de los componentes de fibra insoluble

Métodos de extracción	% (b.s.)		
	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina
Método I (referencia)	30.34 ± 2.02	11.24	3.40 ± 2.27
Método II (uso de presión)	36.80 ± 3.18	12.11	3.08 ± 2.08
Método III (uso de solución ácida)	43.48 ± 3.33	9.25	4.37 ± 2.30

Los resultados de la Tabla 14, fueron comparados con los valores reportados previamente del bagazo del *Agave tequilero*, cuyos valores son de 41.9, 12.1 y 7.2%; tanto para celulosa, hemicelulosa y lignina respectivamente (González *et al.*, 2005) existiendo una ligera variación en cada uno sobre todo en la lignina. Otros datos de referencia que se tiene es el concentrado de fibra de piña (*Ananas comosus L*), en el que los valores de celulosa, hemicelulosa y lignina, están en el orden de 27, 43.8, 10.8 % respectivamente (Fernández, 2006).

7.2.1 Capacidad de absorción de agua (CAA)

En la Tabla 15, se tienen los resultados de la CAA, proveniente de tres métodos de extracción, subdivididos en tres lotes y con tres repeticiones cada uno. Los resultados están expresados en gramos de agua absorbida por gramo de materia seca, siendo el promedio general 9.22 para el método I, 9.83 para el método II y 4.31 para el método III respectivamente.

Tabla 15
Capacidad de absorción de agua (CAA)

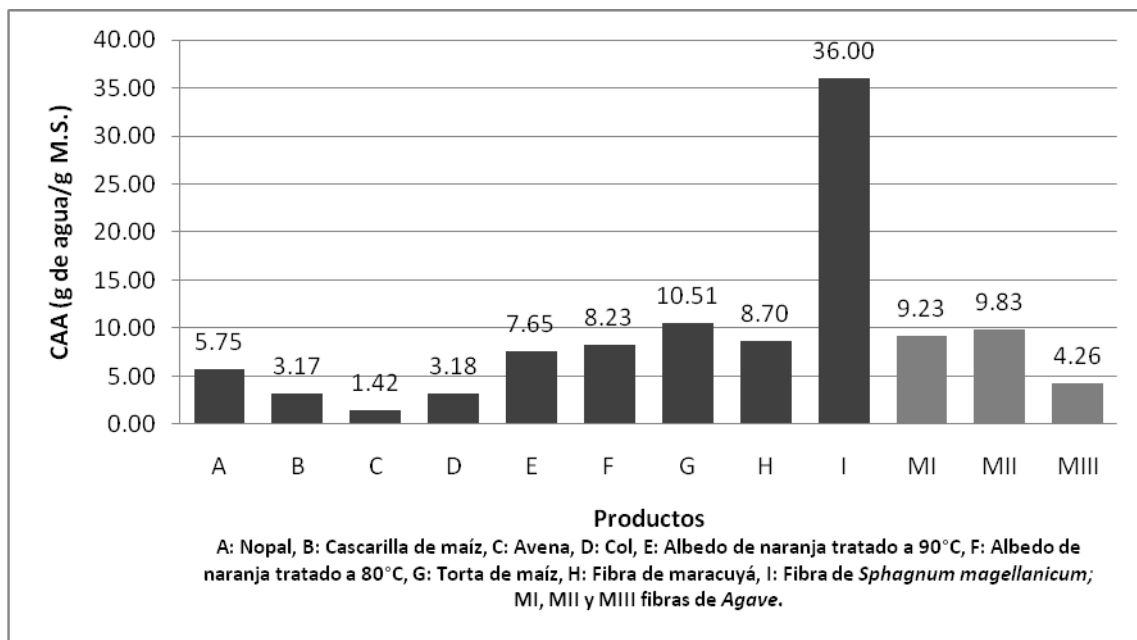
Métodos	Extracción	CAA (g agua/g M.S.)*	Promedio
I	A	9.21 ± 0.08 ^a	9.22
	B	9.26 ± 0.08 ^a	
	C	9.21 ± 0.06 ^a	
II	A	9.89 ± 0.33 ^b	9.83
	B	9.83 ± 0.38 ^b	
	C	9.78 ± 0.21 ^b	
III	A	4.11 ± 0.07 ^c	4.31
	B	4.41 ± 0.17 ^c	
	C	4.41 ± 0.17 ^c	

* Media ± Desviación estándar, n=3.

Tomando como referencia el valor de 9.22 (MI), existe un incremento en la CAA cuando se modifica las variables de extracción por el MII (tratamiento con presión), ocurriendo lo contrario con el método III (tratamiento con ácido). Sin embargo, para establecer la diferencia estadística de las medias de los valores de CAA, en función a los métodos de extracción de la fibra; se realizó el análisis de varianza (ANOVA), reportándose diferencias significativas ($p < 0.01$) entre los métodos de extracción, por el que se afirma que los factores que intervienen en el tratamiento, sí tienen un efecto importante sobre esta propiedad funcional de la fibra proveniente de las hojas de *Agave*, mostrando en un caso el incremento y en otro una disminución. El fundamento de la variación de la CAA, se puede atribuir en el primer caso, al efecto de la presión de vapor del agua, que modifica las propiedades físicas de la fibra insoluble, constituidas básicamente por celulosa, hemicelulosa y lignina, que al ser sometidas a un tratamiento termomecánico, produce una disgregación efectiva del material en sus tres componentes (Ballesteros *et al.*, 2002), además de la desintegración, el incremento de los poros, el debilitamiento de la intensidad de los enlaces de hidrógeno (Farriol, 2005), lo que permite el incremento del área de contacto entre la fibra y el agua (Gutiérrez, 2005),

argumentos que pueden justificar el incremento de la CAA para las fibras tratadas con presión. Relacionando con la composición química, se observa que las fibras tratadas por el método II, tiene una ligera ventaja en el contenido de la hemicelulosa (12.11%), componente que se caracteriza 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 una mayor capacidad de absorber las moléculas de agua.

Para el tratamiento seleccionado del método III (tratamiento con solución de ácido clorhídrico), la capacidad de absorción del agua disminuyó notablemente en comparación al MI desde un valor de 9.23 a 4.26, representando un 53.80% de descenso, muy a pesar de tener la mayor concentración del FND. Este efecto se atribuye a que las fibras tratadas con ácidos, logran perder en primer lugar a la hemicelulosa, propiciando el incremento de la concentración de la celulosa con 43.48% (Tabla 14), este último caracterizado por el alto grado de ordenación (presencia de la estructura cristalina) lo que permite la poca solubilidad e interacción con el agua (Badui, 2006), además de una ligera superioridad en la concentración de lignina (4.37%) respecto a otros tratamientos, componente que también presenta una baja solubilidad (Ferrer *et al*, 2002).



Fuente: Elaborado con datos de la Tabla 5.

FIGURA 4. Capacidad de absorción de agua (CAA) de fibra de *Agave* comparado con otros productos.

Comparando la capacidad de absorción del agua de la fibra del *Agave*, en función a otros productos de origen vegetal, el producto en estudio supera ampliamente, principalmente los que fueron tratados con presión y temperatura (MI y MII). En la Figura 4, se puede observar como ejemplos la fibra de nopal que solo alcanza el 5.75, de la avena con 1.42, y con un valor muy cercano está la fibra de desecho de naranja con 8.23; y siendo ligeramente superada únicamente por torta de maíz con 10.51. Por otro lado comparado con el valor de fibra de *Sphagnum magellanicum* (musgo) cuyo valor es 36 g de agua/M.S. (Villarroel, 2003), que supera ampliamente al producto en estudio, resaltando que provienen de un origen distinto al vegetal.

7.2.2 Capacidad de retención de agua (CRA)

La capacidad de retención del agua está en relación directa con la capacidad de absorción del agua; sin embargo es necesario precisar que el primero además de

absorber las moléculas de agua, mide la capacidad de retenerla a lo largo del tiempo, razón por lo que en la metodología descrita, el centrifugado se efectúa después de haber almacenado por 24 horas. En la Tabla 16, se observan los resultados de la capacidad de retención del agua expresados en gramos de agua retenida por gramo de materia seca (g de agua/g de M.S.), los que provienen de tres métodos de extracción, subclasificado en tres lotes y cada uno con tres repeticiones. Los valores promedios obtenidos son: 7.54 en método I, 8.16 en método II y 4.1 en método III.

Tabla 16
Capacidad de retención de agua (CRA)

Métodos	Extracción	CRA (g agua/g M.S.)*	Promedio
I	A	7.33 ± 0.23 ^a	7.54
	B	7.65 ± 0.08 ^a	
	C	7.66 ± 0.09 ^a	
II	A	8.28 ± 0.29 ^b	8.16
	B	8.11 ± 0.14 ^b	
	C	8.09 ± 0.82 ^b	
III	A	4.19 ± 0.16 ^c	4.10
	B	4.13 ± 0.08 ^c	
	C	3.99 ± 0.03 ^c	

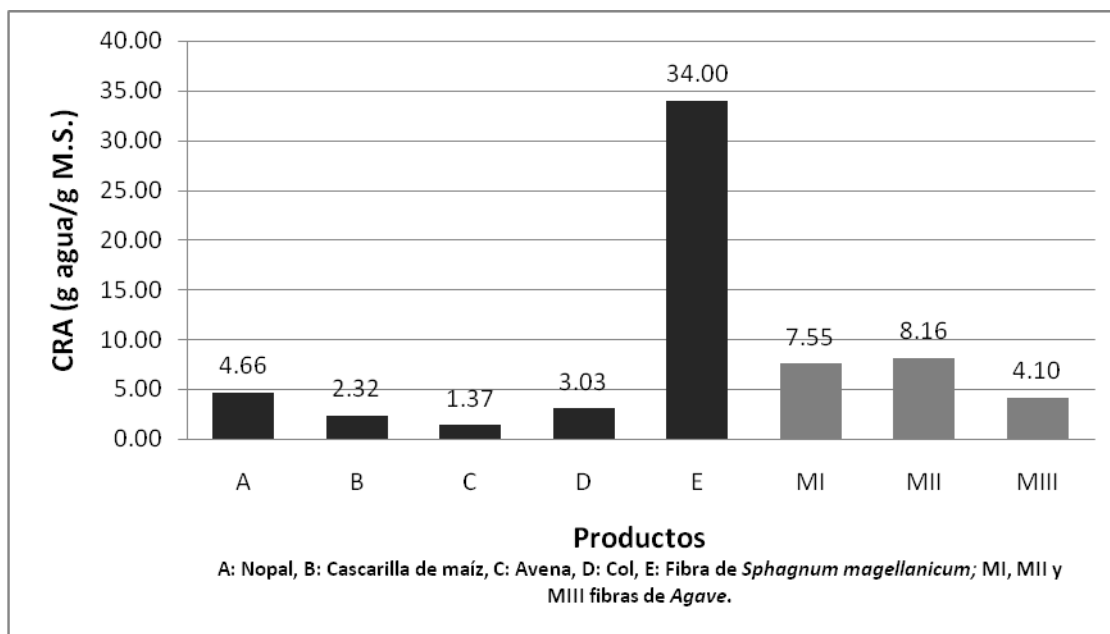
* Media ± Desviación estándar, n=3.

Se puede apreciar que los factores que intervienen en los métodos de extracción, tiene efectos sobre la capacidad de retención del agua, tal como fundamenta Linden (1996), que los tratamientos mecánicos y enzimáticos modifican la capacidad de hidratación de la fibra, además es dependiente del pH, fuerza iónica y temperatura. En este caso, el tratamiento con presión de vapor del agua (método II), incrementa los valores de la CRA a 8.08%, lo que permite afirmar parcialmente que las fibras extraídas con este método, mejoraran la función fisiológica, tal como la aceleración del tiempo de

tránsito intestinal como consecuencia del incremento del volumen de las heces (Zambrano *et al.*, 2002), afirmaciones que mas adelante son contrastados con ensayos biológicos. Por su parte la fibra tratada con una solución ácido (método III), tiene un efecto contrario disminuyendo esta propiedad.

Los resultados de la CRA pueden ser un buen reflejo de la composición y del estado estructural de los componentes no solubles de las fibras puesto que, en todos los casos, los diferentes procesos de extracción modifican las estructuras terciarias y, por consiguiente, el volumen hidrodinámico donde se incorporará el agua a la estructura durante la hidratación (Córdoba, 2005), por el que la proporción de cada uno de los componentes de la fibra insoluble tiene efectos determinantes sobre esta propiedad. Para el método II (tratamiento con vapor), una alta CRA, se atribuye a la presencia de mayor cantidad de los grupos hidroxilo disponibles que dejaron de interactuar intermolecularmente entre las orientaciones paralelas de la celulosa debido al tratamiento termomecánico, con el que se facilita el mayor establecimiento de los puentes de hidrógeno de las moléculas de agua (Velázquez de Castro, 2007); esta unión además es favorecida por la estructura ramificada de la hemicelulosa, lo permite la acumulación de agua en la matriz de la fibra. En el caso del tratamiento III (solución ácida), ocurre exactamente lo contrario en donde disminuye considerablemente la CRA, por la mayor concentración de la celulosa y la remoción de la hemicelulosa. Finalmente las ligninas contribuyen negativamente en la CRA por ser moléculas con elevado peso molecular, que son insolubles en ácidos y en álcalis fuertes (Velázquez de Castro, 2007).

Para validar estadísticamente la afirmación anterior, se hizo el análisis de varianza ANOVA en el que se reporta una diferencia altamente significativa ($p < 0.01$) entre los métodos de extracción; y al efectuar la comparación múltiple de medias de los valores de la CRA, se identificaron tres grupos diferentes, perteneciendo uno a cada método de extracción.



Fuente: Elaborada con datos de la Tabla 5.

FIGURA 5. Capacidad de retención de agua (CRA) de fibra de *Agave* comparado con otros productos.

Comparando los valores de la CRA de la fibra del *Agave* con otros productos estudiados (Figura 5), tanto los extraídos por el método II y III, presentan valores ampliamente superiores tal como al del nopal que tiene 4.66, cascarilla de maíz con 2.32, avena con 1.73; siendo superado únicamente por la fibra de *Sphagnum magellanicum*.

7.2.3 Capacidad de adsorción de aceite (CAG)

Los resultados de la capacidad de adsorción del aceite se presentan en la Tabla 17, los que provienen de tres métodos de extracción, agrupados en tres grupos con tres repeticiones cada uno. Los resultados están expresados en gramos de aceite adsorbido por gramo de materia seca (g aceite/g M.S.). La fibra del *Agave* extraída por el método I (referencia), presenta un valor de 4.70, siendo este valor superado por el método II con 4.90, lo que significa un incremento hasta en un 4.26%, y ocurriendo lo contrario cuando

la fibra es tratada con una solución ácida disminuyendo a 2.96 que representa el 37%, en ambos casos con respecto al tratamiento de referencia (MI).

Tabla 17
Capacidad de adsorción de aceite (CAG)

Métodos	Extracción	CAG (g aceite/g M.S.)*	Promedio
I	A	4.84 ± 0.15 ^a	4.70
	B	4.56 ± 0.12 ^a	
	C	4.70 ± 0.01 ^a	
II	A	5.05 ± 0.08 ^b	4.90
	B	4.86 ± 0.25 ^b	
	C	4.78 ± 0.19 ^b	
III	A	2.92 ± 0.01 ^c	2.96
	B	3.01 ± 0.12 ^c	
	C	2.94 ± 0.06 ^c	

* Media ± Desviación estándar, n=3.

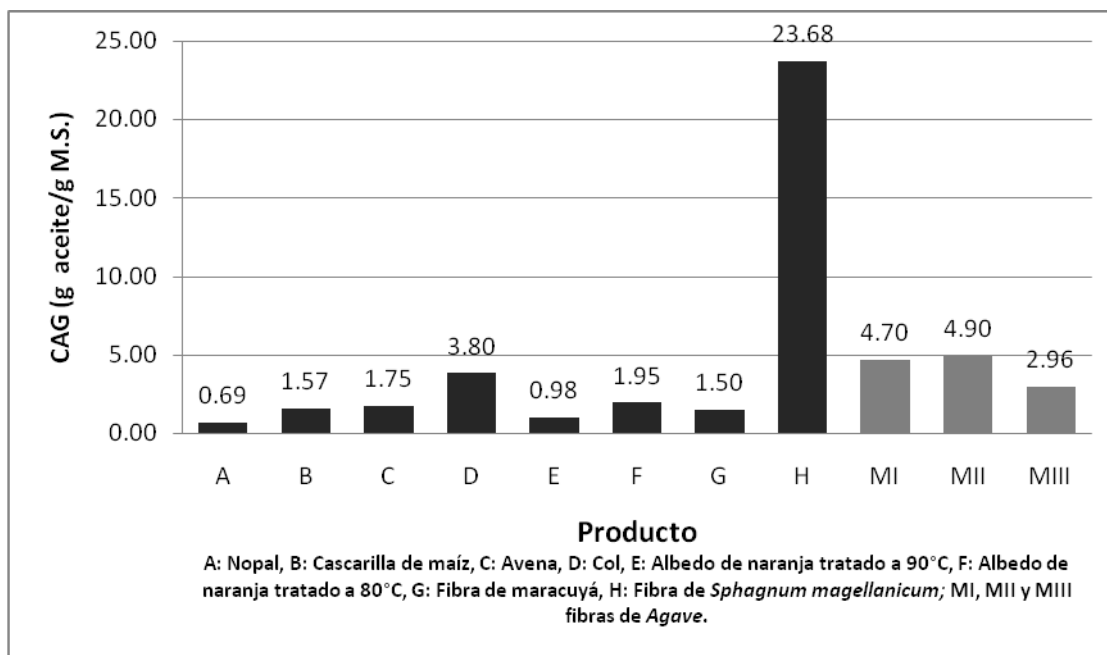
Muchos de los investigadores, también conocen a esta propiedad física como la capacidad de absorción de moléculas orgánicas (CAMO), que mide de manera indirecta cuánto aceite puede absorber una determinada fibra y puede relacionarse con el comportamiento a nivel intestinal, en donde la absorción de los nutrientes grasos depende de la formación de micelas o pequeñas esferas consistentes de grasa y ácidos biliares. En base a esta propiedad la fibra dietaria puede ligarse en el intestino a sales biliares, colesterol, drogas, compuestos tóxicos y carcinogénicos (Story *et al.*, 1982), permitiendo su excreción por las heces (Zhang *et al.*, 1994). A la lignina, pectina, goma guar, se han identificado como los componentes de la fibra con mayor capacidad para unirse a moléculas orgánicas (Story, *et al.*, 1982)

Para establecer la influencia de distintos factores en cada método de extracción, se efectuó el análisis de varianza, del que se concluye que existe una alta diferencia

significativa ($\alpha < 0.01$) entre las medias de los valores de la CAG; es decir, la aplicación de la presión de vapor de agua y el tratamiento con solución ácida, incrementa en el primer caso y disminuye en el segundo sobre esta propiedad física.

En la Figura 6, se tiene la comparación de la capacidad de adsorción del aceite con otros productos, tal como del nopal que alcanza solo el 0.69, y un valor más cercano está el col con 3.80. La fibra de *Sphagnum magellanicum*, presentan valores muy por encima del producto en estudio con 23.68 (Villarroel, 2003). Los valores altos de la capacidad de adsorción del aceite de la fibra de *Agave*, comparado con otros productos, se atribuye al alto contenido de la fibra insoluble, tal como afirma Villarroel (2003); quien argumenta que esta propiedad funcional está relacionada con la composición química, y el tamaño y área superficial de las partículas de fibra y que se ha determinado que las fibras insolubles presentan mayores valores de absorción de moléculas orgánicas que las solubles, tanto por su contenido en lignina como por su mayor tamaño de partícula. Esta afirmación se puede corroborar con los estudios realizados sobre la fibra del nopal y de col, productos que presentan un bajo contenido en fibras insolubles (12.65 y 23.8%) cuyo valor de la CAG fueron de 0.688 y 3.8 respectivamente (Zambrano, 2002) a comparación de la fibra del *Agave* tratada con presión que presenta un valor de 4.9.

Sobre los valores obtenidos en esta segunda etapa que corresponde a la evaluación de propiedades funcionales por métodos físicos, contrastando con los objetivos de la investigación, se puede afirmar claramente que la fibra extraída por el MII (tratamiento con presión) es la que presenta mejores capacidades tanto en la absorción y retención del agua y adsorción del aceite, además de superar en estos parámetros a la mayoría de los productos estudiados en distintas investigaciones.



Fuente: Elaborada con datos de la Tabla 5.

FIGURA 6. Capacidad de adsorción de aceite (CRG) de fibra de *Agave* comparado con otros productos.

7.3 Propiedades funcionales de la fibra por métodos biológicos

7.3.1 Composición proximal de alimentos

Los valores del análisis proximal de cada dieta alimentaria (4 grupos), se aprecia en la Tabla 18, las que al ser comparados con respecto a la formulación teórica (Tabla 8); existe una ligera variación en todos los componentes tal como la cantidad de proteína, ceniza, grasa, fibra dietética y carbohidratos. Siendo así, que para el caso del contenido de proteína varían entre 16.06 y 18.01%, con respecto al teórico de 20%; así como la grasa que varia entre 10.01 y 12.77%, con respecto al 10% teórico; ocurriendo igual variación tanto para ceniza, fibra dietética y los carbohidratos. Se estima que esta variación está relacionada con el contenido de humedad presente en los ingredientes utilizados para la formulación; puesto que, teóricamente se asumió el valor “cero” para este componente y revisando la información técnicas de cada ingrediente (Anexos), el contenido de humedad varía desde 5 a 8%, valor que es suficientemente considerable para variar la composición final de la dieta; sin embargo, al ser proporcional la variación

de los componentes, da confianza en que no se tenga influencias sobre los efectos fisiológicos en los ensayos biológicos.

Tabla 18
Composición proximal de las dietas experimentales

Componentes	Porcentaje (%) en base seca							
	G0		G1		G2		G3	
	5%	10%	5%	10%	5%	10%	5%	10%
Hidratos de carbono	60.48	58.76	61.42	57.78	63.40	58.78	61.02	57.30
Proteína (Nx6.38)	17.14	18.01	17.39	17.64	16.75	16.06	17.40	17.58
Extracto etéreo	12.77	10.01	11.08	10.79	10.11	11.26	11.72	11.62
Fibra dietética total	6.20	9.98	6.34	10.20	6.23	10.21	6.30	10.03
Cenizas	3.41	3.25	3.77	3.59	3.51	3.69	3.56	3.47

7.3.2 Peso de las heces

Con los resultados que se presentan en la Tabla 19, se efectuó un análisis desde dos ópticas; siendo el primero, el comportamiento del peso de las heces excretadas en función al porcentaje de inclusión de la fibra en el alimento (5 y 10%) y el segundo, desde el punto de vista del método de extracción que se utilizó (tratamiento de referencia, uso de presión y la solución ácida), en el que además se incluyó la fibra comercial (alfa celulosa), todas ellas recolectadas en un periodo de diez días.

El incremento del porcentaje de la fibra en la dieta de los animales de experimentación, se traduce como un efecto en el aumento del peso de las heces en la totalidad de los grupos. Para el grupo 0, en el que se incluyó la fibra comercial (alfa celulosa) al 5%, presentó el peso de las heces fecales en promedio de 1.78 g/día, y que al

incrementar al 10%, ésta incrementa a 2.85 g/día, lo que representa un aumento en el peso hasta en un 60.66%; este mismo efecto se aprecia en los grupos I, II y III, con porcentajes de incremento en 52.24, 78.06 y 40.76% respectivamente. Estos efectos contrastan con las afirmaciones de Rodríguez (1993), quien señala que el peso de las heces se ven aumentada por la propia presencia física de la fibra que ha resistido la degradación bacteriana (fibra insoluble) y por la retención del agua que origina. Por otro lado está directamente relacionada con el contenido de la fibra en la dieta, que al ser un componente resistente a la hidrólisis enzimática en el intestino (Velázquez de Castro, 2003) no son digeridas en el tracto digestivo (Badui, 2006). Además, el contenido de agua fecal retenida, la presencia de residuos sin fermentar proveniente de la celulosa (fibra dietética insoluble) y por último al aumento de la masa microbiana (Cherbut *et al.*, 1997), son las que contribuyen al incremento del peso.

Tabla 19
Peso de las heces excretadas por las ratas (g/día/rata)

Grupos *	5% de inclusión **	10% de inclusión **
0	1.78 ± 0.20 ^a	2.85 ± 0.35 ^a
I	1.70 ± 0.14 ^a	2.59 ± 0.21 ^a
II	1.36 ± 0.32 ^a	2.41 ± 0.19 ^a
III	1.76 ± 0.25 ^a	2.48 ± 0.21 ^a

* Grupo 0: fibra comercial (alfa celulosa), Grupo I: tratamiento de referencia, Grupo II: tratamiento con presión, Grupo III: tratamiento con solución ácida.

** Media ± Desviación estándar, n=5.

Al efectuar la interpretación de los resultados en función al tipo de tratamiento al que fue sometida la fibra; cuando se incluyó tanto en 5 y 10% se puede observar una ligera superioridad en cuanto al peso de las heces del grupo de ratas alimentadas con alfa celulosa comercial (grupo 0), comparado con los grupos alimentados con la fibra del

Agave (grupos I, II, III); sin embargo, estadísticamente, no existen diferencias entre las medias del peso de las heces alimentadas con fibras provenientes por diferentes métodos de extracción, lo que hace suponer que la fibra en estudio (*Agave tequilana*), presentaría similares efectos fisiológicos en el organismo al de la fibra comercial. La ligera superioridad en el valor del peso fecal de las ratas alimentadas con fibra comercial (alfa celulosa) comparado con los grupos I, II y III alimentadas con la fibra proveniente del *Agave*, se atribuye principalmente al contenido de FND, cuyo valor para el grupo 0 es de 99% (MP Organic & Rare Chemical Catalog, 2009), comparado con la fibra en estudio que va en el orden de 39.71, 46.74, y 65.14% (Tabla 9, 10 y 11) respectivamente; lo que significa que las fibras del *Agave*, extraídas por diferentes métodos, aun contienen pequeñas cantidades de componentes digeribles; afirmación que se puede relacionar con el trabajo de investigación realizado por González *et al.* (2005) sobre el bagazo del *Agave* (residuo de fabricación de tequila) en el que se reporta contenidos de proteína en 3.31%, además de una posibilidad de la presencia de azúcares totales como producto de la hidrólisis de la celulosa y hemicelulosa, las que tienen posibilidad de ser absorbidos en el organismo. Por otro lado, la composición de las dos fracciones de la fibra insoluble (celulosa y hemicelulosa), puede tener un efecto importante sobre el peso de las heces como consecuencia del proceso de fermentación en el colon; debido a que la celulosa es considerada con un grado de fermentación menor al 10%, con respecto a la hemicelulosa que presenta mayor al 70% (Velazquez de Castro, 2007), puesto que cuantificando estas fracciones, las fibras en estudio, presentan valores en el orden de 11.24, 12.11, 9.25% de hemicelulosa para MI, MII y MIII respectivamente.

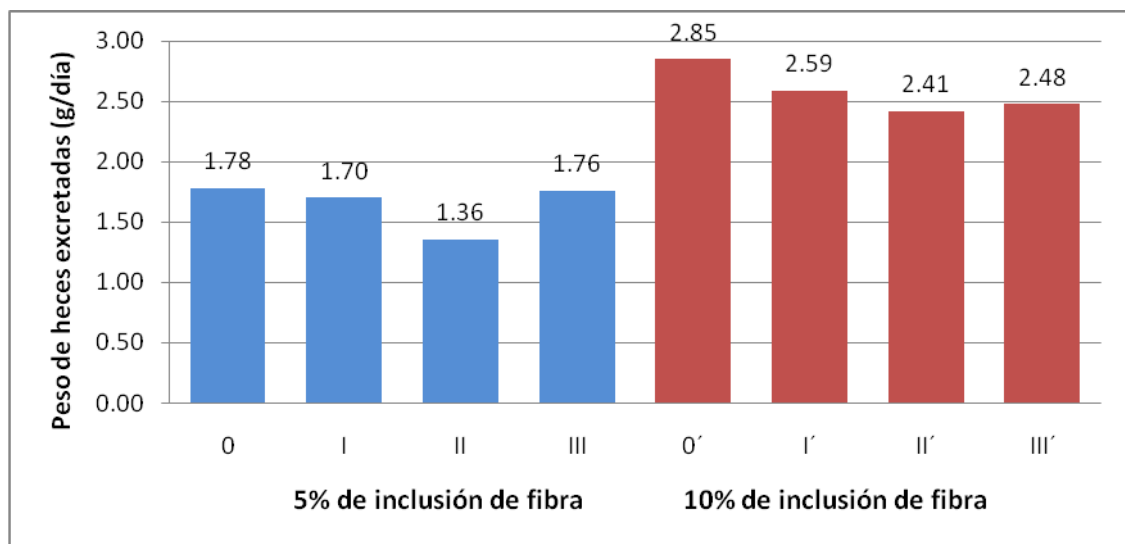


FIGURA 7. Peso de las heces excretadas en función al porcentaje de inclusión y tipo de tratamiento.

Comparado estos resultados con los trabajos efectuados bajo condiciones de las mismas características, con otros productos suplementados con 5% de fibras (Figura 8), los productos en estudio (fibra de *Agave*), supera ampliamente a los productos como betabel, maíz, col y zanahoria; siendo ligeramente superado por el único producto tal como el salvado del trigo con 1.97 g/día de heces excretada (Duque *et al.*, 2002).

7.3.3 Volumen aparente de las heces

En la Tabla 20, se observa que en todos los casos reflejan un incremento en el volumen de las heces fecales conforme incrementa el porcentaje de inclusión de la fibra del 5 al 10%, independientemente de la procedencia y el tipo de tratamiento a las que fueron sometidas. Este resultado es de esperarse debido a que la fibra tiene efectos sobre el volumen fecal, que está directamente relacionado con la capacidad de retención de agua (Mata *et al.*, 1993), gracias a la prevalencia de los grupos hidroxilo presentes en la fibra que establecen puentes de hidrógeno con las moléculas de agua, los que además son fortalecidos por la presencia de los grupos carboxílicos, a través de interacciones iónicas más fuertes se unen con iones metálicos y éstos a su vez con el agua (Velázquez, 2007).



FIGURA 8. Peso de las heces excretadas con 5% de inclusión de fibra de diferentes productos.

Tabla 20
Volumen aparente de las heces excretadas por las ratas (cm³)

Grupos [*]	5% de inclusión ^{**}	10% de inclusión ^{**}
0	28.20 ± 3.05 ^{ab}	57.30 ± 9.61 ^{ab}
I	40.60 ± 10.25 ^b	70.60 ± 8.67 ^b
II	26.70 ± 10.01 ^a	54.20 ± 2.91 ^a
III	41.30 ± 6.70 ^b	59.20 ± 6.62 ^{ab}

^{**} Grupo 0: fibra comercial (alfa celulosa), Grupo I: tratamiento de referencia, Grupo II: tratamiento con presión, Grupo III: tratamiento con solución ácida.

^{**} Media ± Desviación estándar, n=5

Al efectuar el análisis de los resultados en función al tipo de tratamiento al que fue sometido la fibra y su procedencia, se puede apreciar que tanto para el 5% y 10%, con el mayor volumen de las heces fecales corresponde al grupo III, con valores de 41.30 cm³ y 59.20 cm³ respectivamente. Este efecto resulta siendo aparentemente incongruente con los resultados obtenidos en la capacidad de absorción y retención del

agua (métodos físicos), cuyo tratamiento es la que presenta valores más bajos; sin embargo, Schneeman (1986), sostiene que la determinación cuantitativa de la fibra alimentaria no permite predecir su acción biológica, ya que los efectos fisiológicos dependen fundamentalmente de las propiedades fisicoquímicas, que no están relacionadas directamente con la composición química.

Efectuando el ANOVA y la comparación múltiple de medias para el volumen de las heces excretadas, cuando se incluye el 5% y 10% de fibra, el grupo I es la que presenta mayor valor en el volumen de las heces, sin embargo no existe diferencia estadística significativa con los grupos 0 y III, siendo únicamente diferente el grupo II. Estos resultados, se relaciona con la afirmación efectuada por Sastre (2003) quien sostiene que la celulosa tiene forma cristalina y está formada por miles de moléculas unidas en enlaces $\beta(1\rightarrow4)$ y su efecto primordial en el intestino es el de fijar agua, dada su alta capacidad hidrofílica (aproximadamente 0.4 ml/ g de celulosa), en vista de que el grupo III (tratamiento con solución acida) es la que presenta el mayor contenido de celulosa (43.48 %) y específicamente comparado con el grupo 0 que contiene 90.7% de celulosa; sin embargo, no contiene hemicelulosa, el cual puede favorecer a la ligera inferioridad en el volumen fecal, tal como afirma Badui (2006), respecto a la hemicelulosa que tiene una alta habilidad de absorber agua y ayudando a la formación de heces.

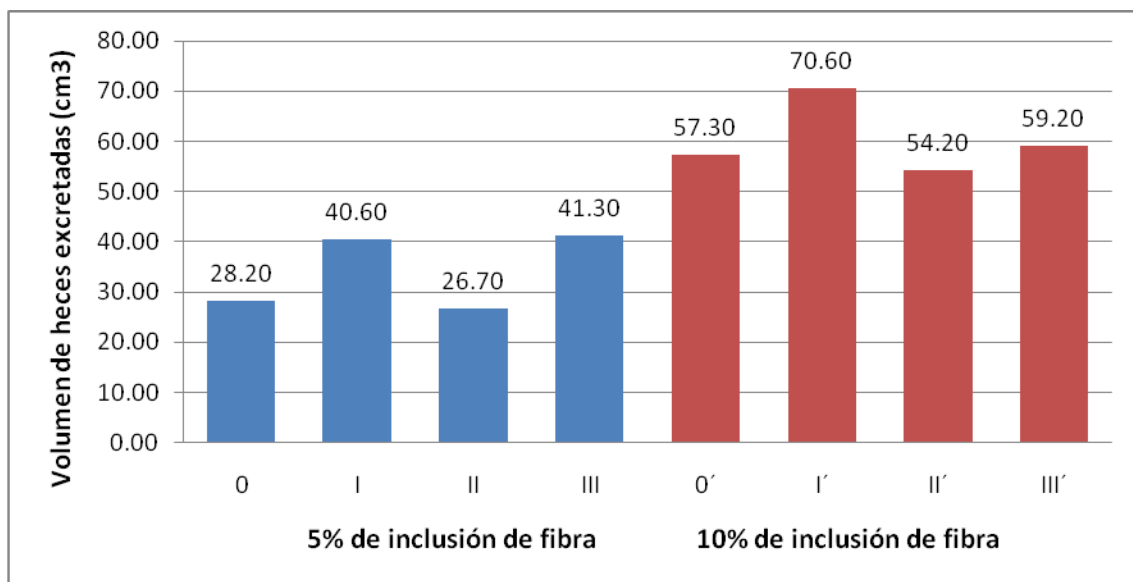


FIGURA 9. Volumen de las heces excretadas en función al porcentaje de inclusión y tipo de tratamiento.

7.3.4 Ganancia de peso de las ratas y eficiencia de conversión alimenticia

Esta variable fisiológica tiene relación directa con peso y el volumen de las heces excretadas por las ratas en función al porcentaje de inclusión de 5 y 10%, además del tipo de tratamiento y el origen de la fibra (Figura 10). En todos los casos, cuando se incluye el 5% de fibra; se observa que hay una mayor ganancia del peso neto corporal de las ratas, con relación a las que fueron alimentadas con 10% de la fibra.

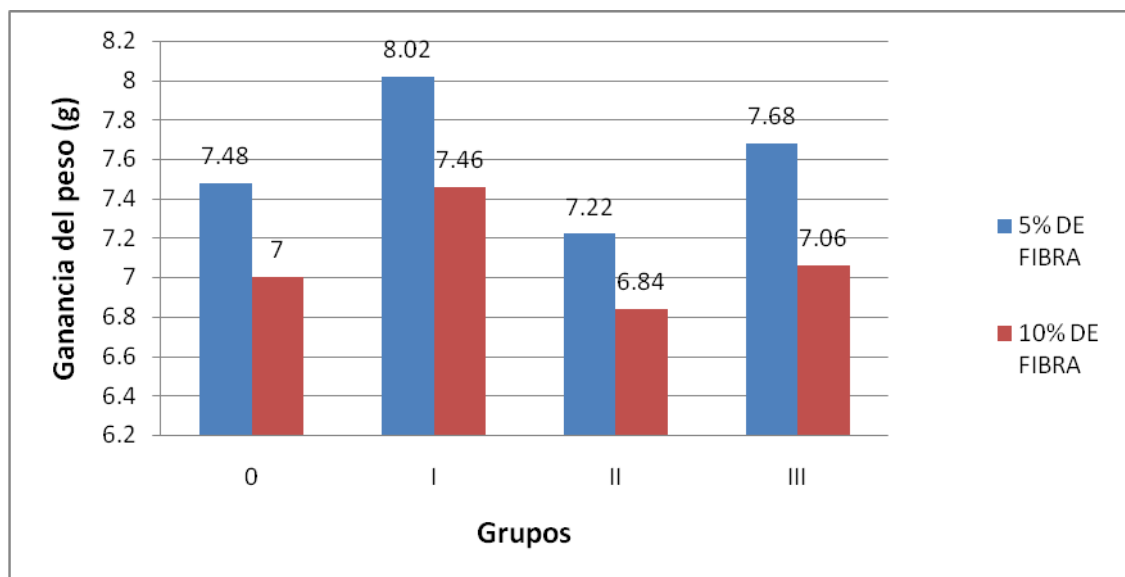


FIGURA 10. Promedio de la ganancia neta del peso (gramos/día)

El grupo que tuvo mayor ganancia de peso neto, corresponde al grupo I (fibra extraída por el MI), tanto para el 5% y 10% de inclusión, resultados que sean probablemente por la presencia de fibras solubles, por las condiciones menos exigente en cuanto a temperatura y acidez a las que fue sometida a comparación con otros dos métodos adicionales (MII y MIII), por el que posiblemente hayan quedado residuos de fibras solubles, las que son fermentables en el colon por la flora microbiana, que contribuyan a aumentar el valor energético del alimento ingerido (Pedersen *et al.*, 1990), afirmación que se puede contrastar con los valor de fibra dietética total obtenida en el análisis proximal (Tabla 18), las que presentan valores ligeramente superior al 5 y 10% en la mayoría de los casos.

Otro aspecto importante que se observó en el bioensayo, es que cuando los animales son sometidos a un proceso de adaptación; generalmente en el periodo inicial, el peso de las ratas disminuyen o se incrementa muy ligeramente por que no ingieren la suficiente cantidad del alimento, debido al cambio del microambiente y en las condiciones de la dieta tanto en sabor, olor, forma y estructura diferente; además del estrés natural que presentan por el cambio una jaula común a otro individual (Álvarez,

2001). La mayoría de los investigadores no informan de la variación de peso recién iniciado el periodo de ensayo, ya que en este momento los animales se encuentran en etapa de adaptación al nuevo régimen (Nishiha *et al.*, 1991).

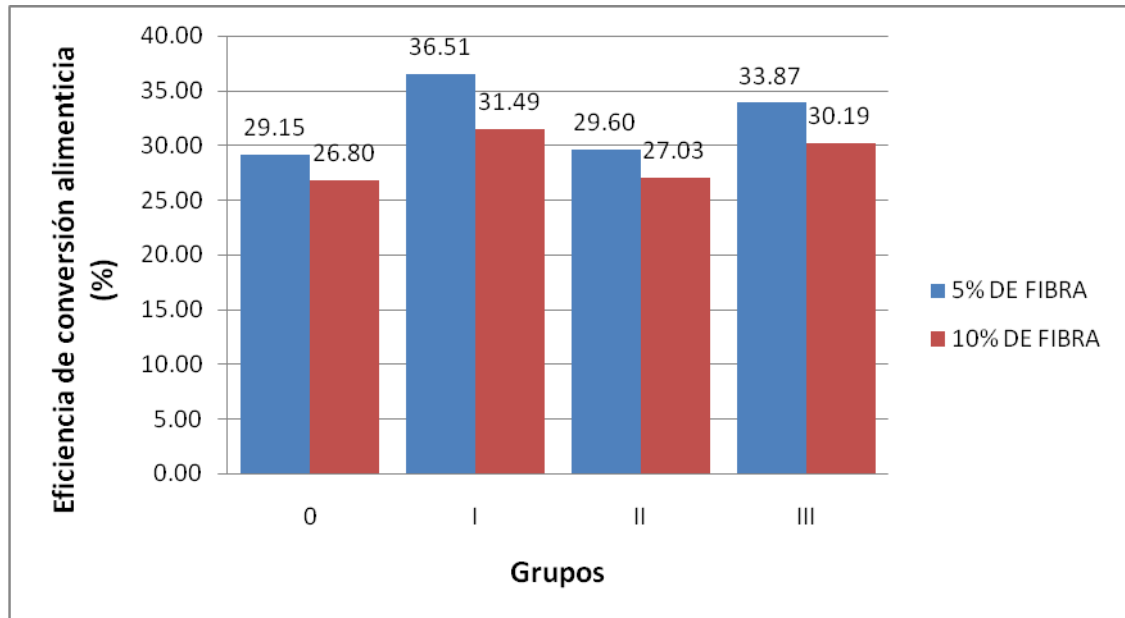


FIGURA 11. Eficiencia de conversión alimenticia (g de peso corporal/g de alimento consumido)

En cuanto a la eficiencia de conversión alimenticia (ECA), se puede observar una superioridad en todos los casos, cuando se incluye el 5% comparado con respecto al 10% de fibra.

7.3.5 Contenido graso en las heces

En la Tabla 21, se tiene los resultados de la cantidad de grasa retenida en las heces excretadas de los animales de experimentación en función al porcentaje de inclusión de la fibra (5 a 10%) y en función al origen y tipo de tratamiento de extracción de la fibra. En todos los casos, se observan que existe un incremento significativo en el contenido de este componente, conforme se incrementa la proporción de la fibra

independientemente del origen y el método utilizado para su obtención. Para el primer grupo de animales (grupo 0), el valor de la cantidad de grasa en las heces es de 7.36 g/100 g para una inclusión de 5% de fibra; este valor se ve incrementado hasta 10.26 g/100 g cuando la cantidad de fibra se incrementa a 10% en la dieta, lo que significa un incremento en 39.40% más de grasa extraída; registrándose similares valores en los tres grupos restantes. Estos resultados coinciden con los fundamentos efectuados por Sastre (2003), quien afirma que la presencia de la fibra tiene una importante influencia sobre los procesos de digestión y absorción de nutrientes. Específicamente en cuanto a los lípidos, el páncreas ejerce su función hidrolítica a través de la lipasa y precisa la formación de micelas previas, capaces de dispersarse por el medio acuoso del intestino, por lo que una dieta abundante en fibra aumenta la presencia de grasa en las heces, ya que reduce la emulsificación con la bilis y dificulta la escisión de los lípidos por acción de la lipasa pancreática (Fernández y Gassull, 1999). Por otro lado, Molina y Martín (2007); argumentan que entre las mallas de la fibra vegetal pueden quedar retenidas algunas sustancias como el colesterol, los ácidos biliares y diversas sustancias tóxicas que se introducen en los alimentos; lo que evita que entren en contacto con la mucosa intestinal, favoreciendo su eliminación.

Tabla 21
Contenido graso de las heces excretadas por las ratas (g/100 g, b.s.)

Grupos**	5% de inclusión *	10% de inclusión *
0	7.36 ± 4.87 ^a	10.26 ± 7.02 ^a
I	3.87 ± 2.29 ^a	4.50 ± 0.65 ^a
II	4.94 ± 0.50 ^a	9.01 ± 7.29 ^a
III	4.34 ± 0.29 ^a	5.00 ± 2.43 ^a

** Grupo 0: fibra comercial (alfa celulosa), Grupo I: tratamiento de referencia, Grupo II: tratamiento con presión, Grupo III: tratamiento con solución ácida.

* Media ± Desviación estándar, n=5

De acuerdo al análisis estadístico efectuado sobre los resultados, se aprecia que no existe diferencia significativa ($p>0.05$) entre las medias proveniente de diferentes método de extracción; a pesar que en la Figura 9, se observa que el grupo 0 (alfa celulosa 5 y 10%), es la que presenta mayores valores de retención de la grasa, seguido de la fibra tratada por el método II (extracción con presión), valores que se puede atribuir en el primer caso por la alta fracción de la celulosa (90%) y en el segundo caso a la presencia de la hemicelulosa en mayor proporción a comparación de los métodos I y III.

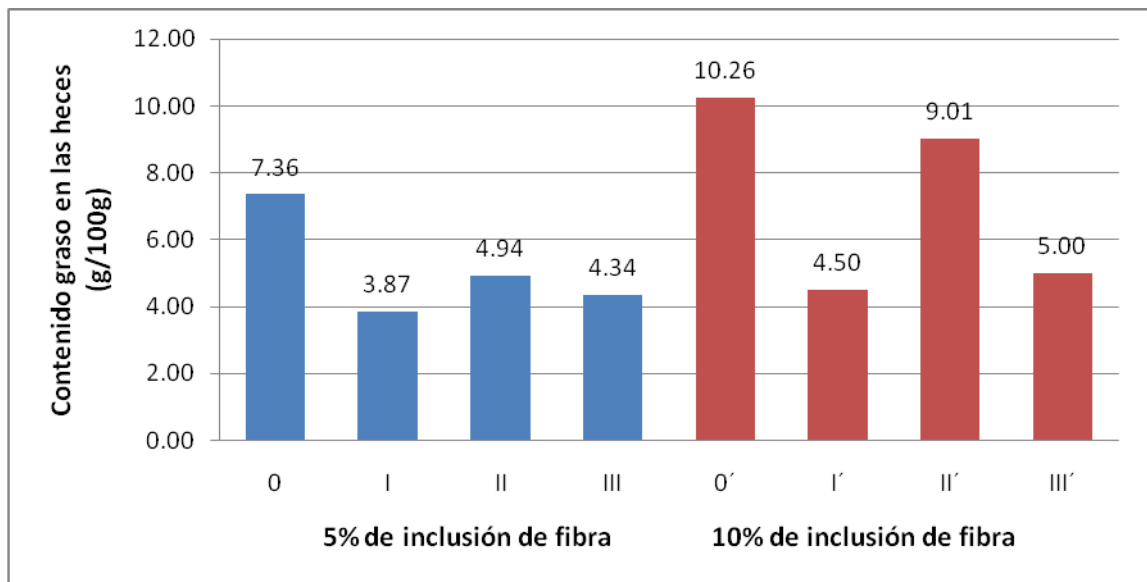


FIGURA 12. Contenido graso en las heces excretadas en función al porcentaje de inclusión y tipo de tratamiento.

7.3.6 Tiempo de transito intestinal

En general se puede apreciar que ante un incremento de las fibras en la dieta de 5 a 10%, se observa una reducción considerable del tiempo de tránsito intestinal; efecto que es debido a la presencia de las fibras insolubles tal como la celulosa, diversas hemicelulosas y la lignina, los que se caracterizan por su escasa capacidad para formar soluciones viscosas a pesar de que pueden retener agua, aunque esta capacidad es

siempre menor que en el caso de las solubles (Redondo, 2002). Los resultados del tiempo de tránsito intestinal se observa en la Tabla 22; parámetro fisiológico en el que la fibra insoluble, tiene la propiedad de aumentar el bolo fecal y disminuir el tiempo de tránsito intestinal, siendo muy útil para el tratamiento y la prevención del estreñimiento (Agett *et al.*, 2003).

Tabla 22
Tiempo de tránsito intestinal (horas)

Grupos*	5% de inclusión **	10% de inclusión **
0	15.17 ± 0.87 ^a	13.50 ± 0.29 ^{ab}
I	15.33 ± 0.29 ^a	13.70 ± 0.29 ^{ab}
II	14.83 ± 0.58 ^a	14.17 ± 0.29 ^a
III	12.67 ± 0.50 ^b	12.50 ± 0.29 ^b

* Grupo 0: fibra comercial (alfa celulosa), Grupo I: tratamiento de referencia, Grupo II: tratamiento con presión, Grupo III: tratamiento con solución ácida.

** Media ± Desviación estándar, n=3

Comparado el tiempo de tránsito intestinal entre los grupos de ratas en el que se incluyó alfa celulosa (fibra comercial) con las fibras extraídas por diferentes métodos a partir de las hojas del *Agave*, se observa en los análisis estadísticos una ligera inferioridad (aspecto positivo), en las fibras extraídas por el método III (tratamiento con ácido) tanto para el 5% y el 10% de inclusión, por el que se puede recomendar como aditivo para la inclusión en alimentos deficitarios en este componente.

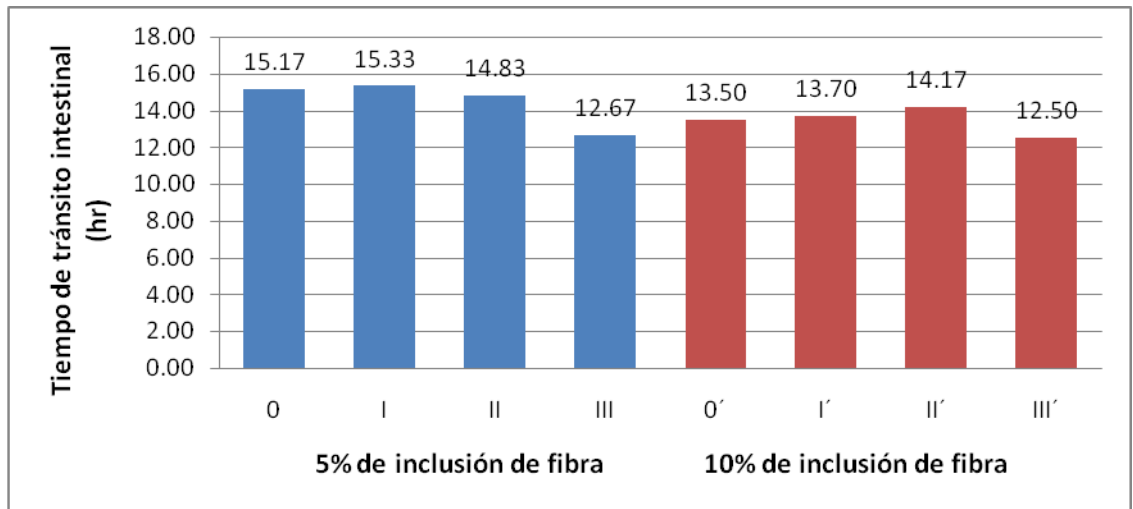


FIGURA 13. Tiempo de tránsito intestinal en función al porcentaje de inclusión y tipo de tratamiento.

8. CONCLUSIONES

La modificación de las variables físicas de tratamiento del método I (referencia), por los métodos II y III basados en tratamiento con presión de vapor de agua y solución ácida respectivamente, se logra incrementar la concentración de FND.

Para el método III, el tratamiento que permitió concentrar la mayor cantidad de fibra y a menores costos corresponde a las variables de 70°C, 5 min. y 0.1N HCl con 65.14% de FND, seguido por el método II con las variables de 0.5 kgf/cm², 5 min. y 1:3p/v con 46.74% de FND, los que además fueron seleccionados para la evaluación de las propiedades funcionales por métodos físicos y biológicos.

En la evaluación de las propiedades funcionales de la fibra del *Agave* por métodos físicos (capacidad de absorción de agua, capacidad de retención de agua y la capacidad de adsorción del aceite), comparado con la fibra extraída por el método de referencia; el método II (tratamiento con presión), mejoró ligeramente en todos los casos, ocurriendo efectos contrarios para el método III (tratamiento con ácido), en la que hubo un descenso significativo en todos los parámetros evaluados. Los valores de las propiedades funcionales de la fibra del *Agave*, en función a otras fuentes de fibra, el producto en estudio presenta valores superiores respecto a otros productos estudiados en similares condiciones, siendo únicamente superado por la fibra proveniente de *Sphagnum magellanicum* cuyo origen es distinto al vegetal.

En la evaluación de las propiedades funcionales por métodos biológicos (con animales de experimentación), las fibras incluidas del *Agave* y alfa celulosa, en proporciones de 5 y 10%, se observó efectos fisiológicos favorables en todos los casos, tanto en el incremento del peso y el volumen de las heces fecales, en la cantidad de grasa

retenida y en la reducción del tiempo de tránsito intestinal; características requeridas de una fibra para que puedan ser viables su inclusión en alimentos para humanos.

Comparado entre los diferentes métodos de extracción en función a la fibra comercial, tanto en la cantidad de grasa extraída y el peso de las heces fecales, presentan similares comportamientos en todos los caso; sin embargo, la fibra extraída mediante el uso de presión es la que tuvo un mejor resultado en la reducción del tiempo de tránsito intestinal, gracias a las propiedades físicas y la composición de la fibra, el que se relacionó directamente con el incremento del volumen de las heces fecales.

9. BIBLIOGRAFIA

AACC Dietary Fiber Technical Committee. 2001. The definition of dietary fiber. *Cereal Foods World* 46:112-126.

AOAC, Official Methods of Analysis 17th. 2002. Ed. Association of Official Analytical Chemistry, Arlington, Washington D.C.

Agett PJ, Agostini C, Axelsson I, Edwards CA, Goulet O, Hernell O. 2003. Nondigestible carbohydrates in the diets of infants and young children: A commentary by ESPGHAN Committee on Nutrition. *J. Pediatr. Gastroenterol Nutr.*, 36:329-337.

Aguilera JM, San Martín R. 1985. Steam explosion of pine (*Pinus radiata*) sawdust. *Biomass* 8:301-313.

Álvarez, G, 2001. *Efecto de la ingesta de fibra de amaranto germinado, sobre los niveles de lípido en suero de rata y ratón*. Tesis (MC). Instituto Politécnico Nacional.

ANKOM, 2008. *Neutral Detergent Fiber in Feeds Filter Bag Technique*. [internet]. ANKOM Technology Method. Disponible en el sitio de red: http://www.ankom.com/00_products/product_a200.shtml
Revisado el 12 de octubre del 2008.

Arizaga S, Ezcurra E. 1995. Insurance against reproductive failure in a semelparous plant: bulbil formation in *Agave macroacantha* flowering stalks. *Oecologia* 101:329-334.

Arizaga S, Ezcurra E. 2002. Propagation mechanisms in *Agave macroacantha* (Agavaceae), a tropical arid-land succulent rosette. *American Journal of Botany* 89: 632-641.

Arizaga, S, 1998. *Biología Reproductiva de Agave macroacantha Zucc. en Tehuacan, Puebla*. Tesis (Dr). Universidad Nacional Autónoma de México.

Asp NG, Johansson CG. 1984. Dietary fibre analysis. *Nutrir Abs. Rev. Clin. Nutr.*, 54:735-752.

Badui S. 2006. *Química de los Alimentos, Cuarta Edición* (eds). Pearson Educación: México, pp. 78-109.

Ballesteros I, Oliva JM, Negro MJ, Manzanares P, Ballesteros M. 2002. Proceso de sacarificación y fermentación simultáneas para la conversión de la fracción celulósica del residuo de la extracción del aceite de oliva en etanol. *Grasas y Aceites* 53:282-288.

Barcelo J, Nicolas G, Sabater B, Sanchez R. 1992. Pared celular vegetal. En: *Fisiología Vegetal* (eds). Pirámide: Barcelona, pp. 41-56.

Barrios, S, 1982. *Optimización del proceso de obtención de fibra a partir de la penca del agave tequilana por medio del método de superficie de respuesta*. Tesis (Lic). Universidad Autónoma de Guadalajara

Baquero C, Bermudez AS. 2002. Los Residuos Vegetales de la Industria de Jugo de Maracuyá como Fuente de Fibra Dietética. En: *Temas en Tecnología de Alimentos* (eds). Alfaomega: México, pp. 207-214.

Bautista M, García L, Barboza JE, Parra LA. 2001. El *Agave tequilana* Weber y la producción de tequila. *Acta Universitaria* 11:26-34.

Belo PS, Lumen BO. 1981. Pectic substance content of detergent extracted fibers. *J. Agric. Food Chem.* 29:370-373.

Belitz HD, Grosch W. 1997. *Química de Alimentos*. Editorial Acribia S.A.: Zaragoza, pp. 336-337, 351-355, 884.

Boudet AM, Kijita S, Grima J, Goffner D. 2003. Lignins and lignocellulosics a better control of synthesis for new and improved uses. *Trends plant Sci.* 12:576-581.

Buchanan CH. 1999. Fibra. En: Van Way CHN (eds). McGraw-Hill Interamericana: México, pp. 35-38.

Burdaspal PA, Velez F, Legarda MI, Pinilla I. 1980. Expresión del contenido en fibra de los alimentos: fibra bruta y fibra Alimentaria. *Alimentaria* 118:45-51.

Burkitt DP, Trowell H. 1975. Some implications of dietary fiber. *Academic London* 2:1408-1412.

Cámara Nacional de la Industria Tequilera. 2006. Disponible en el sitio de red: <http://www.tequileros.org/website/industria/documents/InformeEstadistico2006.pdf>
[Revisado el 15 de enero del 2009]

Camire ME. 1999. Chemical and Physical Modifications of Dietary Fiber. En: *Complex Carbohydrates in Foods* (eds). Marcel Dekker: Basel, pp. 373-384.

Carpita NC. 1990. The chemical structure of the cell walls of higher plants. En: *Dietary Fiber: Chemistry, Physiology and Health Effects*. D. Kritchevsky, C. Bonfield and J. W. Anderson (eds). Plenum Press: New York, pp. 15-30.

Carnvale E, Lintas C. 1995. Dietary fibre: efect of processing and nutrient interactions. *Eur. J. Clin. Nutr.* 53:307-311.

Chang M, Chou T, Tsao G. 1981. Structure, pretreatment and hydrolysis of cellulose. *Adv. Biochem. Eng.* 20:15-40.

Cherbut C, Aube AC, Mekki N, Dubois C, Lairon D, Barry JL. 1997. Digestive and metabolic effects of potato and maize fibres in humans subjects. *Br. J. Nutr.* 77:33-45.

Córdova, A, 2005. *Caracterización de propiedades relacionadas con la textura de suspensiones de fibra alimentaria*. Tesis (Dr). Universidad Politécnica de Valencia.

Cordeiro N, Belgacem MN, Torres IC, Moura JV. 2004. Chemical composition and pulping of banana pseudo-stem. *Industrial Crops and Products* 19:147-154.

Cummings JH, Branch WJ. 1986. Fermentation and the Production of Short-Chain Fatty Acids in the Human Intestine. En: *Dietary Fiber: Basic and Clinical Aspects* (eds). Vahouny GV, Kritchevsky: New York, pp. 131-152.

Dávila GA. 1984. *Optimización de condiciones para la obtención de microcelulosa a partir de pulpa de Agave tequilana*. Tesis (Lic). Universidad Autónoma de Guadalajara.

Deis CD. 1997. Functional ingrediets from rice. *Food Prod. Desing* 1:45-56.

Department of Health, 1991. *Dietary reference, values for food energy and nutrientes for the United Kingdom*. London.

Dreher ML. 1987. Dietary Fiber Methodology. En: *Handbook of Dietary Filme* (eds). An Appied Approach Marcel Dekker: New York, pp. 234-245.

Duque RL, Gallardo NY, Santoyo MA, Sánchez PE. 2002. Efectos Fisiológicos de Seis Tipos de Fibras Dietéticas Sobre el Volumen Fecal en Ratas Wistar. En: Temas en Tecnología de Alimentos (eds). Alfaomega: México, pp. 79 - 85.

Eguiarte LE, Souza V, Silva A. 2000. Evolución de la Familia Agavaceae: Filogénia, biología reproductiva y genética de poblaciones. Boletín de la Sociedad 41 Botánica de México 66: 131-150.

El Oufir L, Barry JL, Flourié B, Cherbut C. 2000. Relationship between transit time and in vitro fermentation of dietary fiber by fecal bacteria. Eur. J. Clin. Nutr. 54:603-609.

Farriol, X, 2005. *Preparation of methylcellulose from annual plants*. Tesis (Dr) Universitat Rovira i Virgili.

Fennema O. 1993. Química de Alimentos. Editorial Acribia S.A.: Zaragoza, pp. 137-149.

Fernández, LE, 2005. *Fitoquímica del Agave salmiana*. Tesis (Lic) Universidad de las Américas Puebla.

Fernández M, Falco AS, García G, Zelgueira OL. 2006. Obtención de concentrado de fibra de piña (*Ananas comosus* L). Ciencia y Tecnología de Alimentos 16: 56-61.

Fernández JM, Fernández J, Sayas ME, Sendra E, Pérez JA. 2004. Lemon albedo as a new source of dietary fiber: application to bologna sausages. Meat Sci. 67:7-13.

Fernández F, Gassull MA. 1999. Fibra dietética. En: Hernández M, Sastre A., editores. Tratado de Nutrición. Madrid: Díaz de Santos, pp. 125-138.

Ferrer JR, Páez G, Arenas de Moreno L, Chandler C, Mármol Z, Sandoval L. 2002. Kinetics of the acid hydrolysis of sugar cane bagasse pith. *Revista de la Facultad Agronomía* 19:23-33.

Flickinger EA, Van Loo J, Fahey GC. 2003. Nutritional responses to the presence of inulin and oligofructose in the diets of domestic animals: a review. *Crit. Rev. Food. Sci. Nutr.* 43:19-60.

Flores, EG, Morales, HL, 2005. *Biología floral de Agave salmiana*. Tesis (Lic). Universidad de las Américas Puebla.

Foroughbakhch R. 2001. *Estadística para Investigadores*. Universidad Autónoma de Nuevo León: Nuevo León México, pp. 90-98.

Furda I. 1977. Fractionation and examination of biopolymers from dietary fiber. *Cereal Foods World* 22:252-254.

Gañan P, Cruz J, Garbizu S, Arbelaiz A, Mondragón I. 2004. Steam and bunch banana fibers from cultivation wastes: Effect of treatments on physico-chemical behavior. *Journal Appl. Polym. Sci.* 94:1489-1495.

García CL, Alanís MG, Bautista M, Rivas C. 2003. Obtención de un concentrado de fibra a partir de hojas de *Agave tequilana* Weber. En: Sociedad Latinoamericana de Nutrición. XIII Congreso Latinoamericana de Nutrición, Acapulco, México, Noviembre 9-13.

García EG, Infante RB, Rivera CJ. 2008. Hacia una definición de fibra alimentaria. *Anales Venezolanos de Nutrición* 21: 25-30.

García P, Velasco C. 2007. [Evolución en el conocimiento de la fibra.](#) *Nutrición Hospitalaria* 22:20-25.

Gentry HS. 1982. Agaves of continental North America. *Bouteloua* 3:47-55.

Gómez A. 1963. El Género *Agave*. *Cactáceas y Suculentas Mexicanas* 8: 3-25.

González PI, Vázquez G, Gómez R. 2002. Thermoplastic composites reinforced with banana (*Musa paradisiaca L*) wastes. *International Journal of Polymeric Materials* 51:685-694.

González Y, González O, Nungaray J. 2005. Potencial del bagazo del *Agave* tequilero para la producción de biopolímeros y carbohidratosas por bacterias celulolíticas y para la obtención de compuestos fenólicos. *E-Gnosis* 5:1-18.

Granados SD. 1993. Los Agaves en México. Universidad Autónoma de Chapingo. México: pp. 102, 108, 112-113.

Guarner F. 2000. El colon como órgano: hábitat de la flora bacteriana. ANS. Instituto Danone: Madrid, pp. 99-106.

Guardiola JL, García LA. 1990. La Pared Celular. En: *Fisiología Vegetal, Nutrición y Transporte* (eds). Síntesis: Madrid, pp. 27-63.

Guerra de León JO, Nogueiras LC, Laguna AG, De Rojas MP. 2007. Estudio de las ceras obtenidas de hojas del *Agave brittoniana t*. *Revista Cubana de Química* 19: 45-56.

Gutiérrez I, Zuluaga R, Cruz J, Gañán P. 2005. Influence of Steam Treatment on the Structure and Physical-Mechanical Behavior of Plantain Fibers. *Información Tecnológica* 16:15-21.

Hayes G. 1992. Manual de datos Para Ingeniería de Alimentos. Editorial Acribia S.A.: Zaragoza, pp. 33-34.

Hernández T, Hernández A, Martínez C. 1995. Fibra alimentaria, conceptos, propiedades y métodos de análisis. *Alimentaria* 261:19-30.

Hernández AD. 2003. Caracterización de la Fibra de Nopal por Medio de su Respuesta Fisiológica. En: *Temas en Tecnología de Alimentos* (eds). Alfaomega: México, pp. 215-230.

Hispley EH. 1953. Dietary fiber and pregnancy toxemia. *Brit. Med. J.* 2:420-422.

Iñiguez G, Iñiguez F, Valadez A. 2007. Manejo y aprovechamiento de subproductos de la industria tequilera (pencas de agave y vinazas). En: *Primer Seminario Internacional del Tequila SIT 2007*. Universidad de Guanajuato, México. Nov 8.

Kadirvelu K. 2003. Utilization of various agricultural wastes for activated carbon preparation and application for the removal of dyes and metal ions from aqueous solutions. *Bioresource Technology* 87:129-132.

Kanauchi O, Andoh A, Iwanaga T, Fujiyama Y. 1999. Germinated barley foodstuffs attenuate colonic mucosal damage and mucosal nuclear factor kappa B activity in a spontaneous colitis model. *J. Gastroenterol. Hepatol.* 14: 1173-1179.

Kar F, Arslan N. 1999. Effect of temperature and concentration on viscosity of orange peel pectin solutions and intrinsic viscosity-molecular weight relationship. *Carbohydrate Polymers* 40:277-284.

Kim YI. 2000. AGA technical review: impact of dietary fiber on colon cancer occurrence. *Gastroenterology* 118:1235-1257.

Linden G. 1994. Bioquímica Agroindustrial. Editorial Acribia S.A.: Zaragoza, pp. 32-38.

Lewis NG, Yamamoto E. 1990. Lignin: occurrence, biogenesis and biodegradation. Annu. Rev. Plant. Physiol. Plant. Mol. Biol. 41:455-496.

McVaugh R. 1989. Flora Novo-Galiciana. A descriptive account of the Vascular Plants of Western Mexico. Bromeliaceae to Dioscoreaceae 15: 120-283.

Mata A, Gómez de Segura IA, Diaz J, Santamaria L. 1993. Importance of the colon in intestinal adaptation. Study with the proliferating cell nuclear antigen. Rev. Esp. Enferm. Dig. 84:149-152.

Mateu X. 2004. La fibra en la alimentación. Farmacia hospitalaria. Edikamed 12: 56-63.

May CD. 1997. Pectins. En: Thickening and Gelling Agents for Food (eds). Imeson, A., Blackie Academic and Professional: Londres, pp. 230-235.

MP Biomedicals, 2009. *Alphacel Non-Nutritive Bulk*. [internet]. Disponible en sitio red:

http://www.mpbio.com/product_info.php?cPath=491_1_12&products_id=900453&dept_h=nested&keywords=900453

[Revisado el 01 de marzo del 2009].

Molina ME, Martín AP. 2007. La fibra dietética procesada como alimento funcional. Nutrición 26:70-77.

Monreal S, Fernández JM, Fernández J, Sayas E, Pérez JA. 2002. Aspectos fisiológicos y nutritivos de los alimentos funcionales. *Alimentación, Equipos y Tecnología* 8:132-165.

Monte WC, Vaugham LA. 1982. An outline of “fiber” analysis techniques. *J. Appl. Nutr.* 34:45-65.

Moya A, Mateo S, Sánchez S, Bravo V. 2005. Aprovechamiento del residuo de poda de olivo mediante hidrólisis ácida y fermentación con *Cándida shehatae*. *Ingeniería Química* 391:194-196.

Nishina MP, Schneeman O, Freedland AR. 1991. Effects of dietary fibers on nonfasting plasma lipoprotein and apolipoprotein levels in rats. *Am. Inst. of Nutr.* 431-437.

Pedersen B, Bach Knudsen KE, Eggum BO. 1990. The nutritive value of amaranth grain (*Amaranthus caudatus*). *Plant Food Hum* 40:61-71.

Peter L, Pellett L, Young R. 1980. Evaluación Nutricional de Alimentos Proteínicos (eds). Universidad de las Naciones Unidas: Tokyo, pp. 113-128

Reddy N, Yang Y. 2006. Properties of high-quality long natural cellulose fibers from rice straw. *J. Agric. Food Chem.* 54:8077-8081.

Redondo L. 2002. Propiedades de la Fibra Dietética. En: *La Fibra Terapéutica* (eds). Glosa: Barcelona, pp. 29-51.

Redondo A, De la Hoz L, Ordoñez JA. 1996. Fibra alimentaria: propiedades e interés nutricional. *Alimentación, Equipos y Tecnología* 1:77-86.

Reed RA, Williams PT. 2003. Thermal processing of biomass natural fibre waste by pyrolysis. *International Journal of Energy Research* 28: 131-145.

Rodríguez, MD, 1993. *Influencia del tratamiento térmico en la fibra alimentaria y azúcares solubles de productos vegetales*. Tesis (Dr). Universidad Complutense de Madrid.

Sastre A. 2003. Fibra y prebióticos: conceptos y perspectivas. *Gastroenterol Hepatol* 26:6-12.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación SAGARPA. 2008. Disponible en el sitio de red:

http://www.oeidrus-portal.gob.mx/aagricola_siap/ientidad/index.jsp

[Revisado el 4 de enero del 2009].

Schneeman BO. 1986. Dietary fiber: physical and chemical properties, methods of analysis, and physiological effects. *Food Technol.* 2:104-110.

Schweizer TF, Wursch P. 1979. Analysis of dietary fiber. *J. Sci. Food Agric.* 30:613-619.

Shah MP, Reddy GV, Bonarjee R, Babu PR, Kothahi IL. 2005. Microbial degradation of banana waste under solid state bioprocessing using two lignocellulolytic fungi (*Phylosticta* spp. MPS-001) and *Aspergillus* spp. MPS-002). *Process Biochemistry* 40:445-451.

Schaafsma G. 1997. Significance of Probiotics, Prebiotics and Symbiotics to Human Health. En: *The Western Diet Wich Special Focus on Dairy Products* (eds). Schaafsma G: Belgique, pp. 87-95.

Singh RP, Heldman DR. 1998. Introducción a ingeniería de los Alimentos (eds). Acribia: España, pp 11-13.

Slavin JL, Marlett JA. 1983. Evaluation of high-performance liquid chromatography for measurement of the neutral saccharides in neutral detergent fiber. *J. Agric. Food Chem.* 31:467-471.

Slauson LA. 2000. Pollination Biology of two Chiropterophilous Agaves in Arizona. *American Journal of Botany* 87: 825-836.

Southgate DAT. 1969. Determination of carbohydrates in foods II - Unavailable carbohydrate. *J Sci Food Agric* 20:331- 335.

Southgate DAT. 1978. Dietary fiber: analysis and foods sources. *Am. J. Clin. Nutr.* 31:107-110.

Story JA, White A, West LG. 1982. Adsorption of bile acids by components of alfalfa and wheat bran in vitro. *J. Food Sci.* 47:1276-1279

Tamayo Y, Bermúdez AS. 2002. Los Residuos Vegetales de la Industria de Jugo de Naranja Como Fuente de Fibra Dietaria. En: *Temas en Tecnología de Alimentos* (eds). Alfaomega: México, pp. 181-189.

Tejada I. 1992. Control de Calidad y Análisis de Alimentos para Animales. Secretaria de Educación Pública: México, pp. 276-303.

Thomas S, Pothan LA, Neelakantan NR. 1997. Short banana fiber reinforced polyester composites: mechanical, failure and aging characteristics. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 16:744-765.

Van Soest PJ, McQueen RW. 1973. The chemistry and estimation of fibre. Proc. Nutr. Soc. 32:123-130.

Van Soest PJ. 1963b. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds II. A rapid method for the determination of fiber and lignin. J. Assoc. Off Anal. Chem. 46:829-835.

Van Soest PJ, Wine RH. 1967. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds IV. Determination of plant cell wall constituents. J. Assoc. Off Anal. Chem. 50:50-55.

Van Soest PJ, Robetson JB, Lewis BA. 1991. Methods for dietary, neutral detergent fiber, and non starch polysaccharides in relation to animal nutrition. Symposium: carbohydrate methodology, metabolism, and nutritional implications in dairy cattle. J. Dairy Sci. 74:3583-3597.

Velázquez de Castro, OH, 2007. *Efecto de la fibra en un modelo de colitis experimental en rata, papel de los ácidos grasos de cadena corta*. Tesis (Dr). Universidad de Granada.

Villarroel M, Acevedo C, Yáñez 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, ALAN 53:400-407.

Williams CL, Bolella M, Wynder EL. 1995. A new recommendations for dietary fibre in childhood. Pediatrics 96:985-998.

Zambrano ML, Hernández AD, Gallardo Y. 2002. Caracterización fisicoquímica del nopal. En: Temas en tecnología de alimentos. Fibra dietética. Vol. 2, Programa iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo - CYTED (eds). Alfaomega: México, pp. 29-42.

Zhang J, Lundin E, Hallman G. 1994. Effects of rye bran on excretion of bile acids, cholesterol, nitrogen and fat in human subjects with ileostomies. *Am. J. Clin. Nutr.* 59:389-394

ANEXOS 1

Hoja técnica de alfa celulosa (Alphacel Non-Nutritive Bulk)

Description: An extremely fine, white, odorless tasteless, water insoluble, chemically pure cellulose powder, manufactured from natural fibers. It is the main structural component in the cell walls of all members of the plant kingdom.

Preparation: Alphacel is manufactured by a dry, mechanical process from bleached and purified wood pulp. It is pure cellulose as that word is understood in the pulp, paper and cellulose derivatives field. From the chemist's viewpoint, it is composed of roughly 90% beta-1,4-glucan and 9.5% of so-called hemi-celluloses such as xylan, arabar, mannan and galactan. These are not exact values, but will vary somewhat depending on cellulose source for Alphacel, which is usually northeastern U.S. hardwoods such as beech, birch and maple.

Energy Content: For many decades, Alphacel has been used as a harmless, biologically acceptable, bulking agent in the specialized diets of laboratory animals. In this use, the assumption is commonly made that the Alphacel is totally non-caloric. This is probably not completely correct and a certain small portion may be metabolized. The extent of possible digestion is obviously influenced by numerous factors such as the species of animal, the microflora in the digestive tract, the other components of the diet, the time of transit, the physical characteristics (such as a particle size) of the Alphacel, etc.

Crude Fiber Content: The current recognized measure of fiber content for food product labeling purposes is the so-called crude fiber analysis, such as the AOAC method (12th Edition, 7.050-7.054).

Typical Analysis:

Crude Fiber	: 87%
Protein	: 0%
Moisture	: <7%
Fat	: 0.2%
Ash	: <0.3%
Aerobic Plate Count	: < 50/g
Acid Detergent Fiber	: 91%
Neutral Detergent Fiber	: 99%
Lignin	: 0.3%
Pectin	: 0%

Fuente:

http://www.mpbio.com/product_info.php?cPath=491_1_12&products_id=900453&dept_h=nested&keywords=900453

ANEXOS 2

Hoja técnica de caseína (Casein, High Nitrogen)

Physical Description: White to cream powder

Source: *Milk*

Description: Casein, high nitrogen, is a granular milk protein. It is produced by controlled acidification of pure, pasteurized skim milk, resulting in precipitation of casein curd. The curd is then washed, dried, and ground to a consistent particle size.

Typical Analysis:

Protein	: 95.0%
Moisture	: 5.0%
Fat	: 1.5%
Lactose	: 0.2%
Ash	: 2.1%
pH (10% Solution)	: 4.6 to 5.1
Free acids	: 0.2%

Typical Nutritional Analysis:

Calories (Kcal/100 g)	: 360
Calories from fat (Kcal/100 g)	: 10
Fiber (g/100 g)	: 0
Cholesterol (mg/100 g)	: 20
Saturated fat	: 0.7%

Fuente:

http://www.mpbio.com/product_info.php?cPath=491_1_12&products_id=901293&dept_h=nested&keywords=90

ANEXOS 3

Hoja técnica de almidón de maíz (Corn Starch)

Composition: Approximately 75% amylopectin and 25% amylose

Typical Analysis:

% Ash	: 0.10
% Protein	: 0.35
Viscosity (Scott Value)	: 70-100
Heavy Metals	: 10 ppm
% Fat	: 0.15
% Water	: 8.0-9.5
pH	: 4.8-5.8

Fuente:

http://www.mpbio.com/product_info.php?cPath=491_1_12&products_id=902956&dept=h=nested&keywords=902956&processTab=product_information

ANEXOS 4

Hoja técnica de aceite de maíz (Corn Oil)

Typical Fatty Acid Distribution, % of Total Fatty Acids:

C _{12:0} Lauric	: Trace
C _{14:0} Myristic	: Trace
C _{16:0} Palmitic	: 11.2%
C _{18:0} Stearic	: 2.1%
C _{18:1} Oleic	: 25.0%
C _{18:2} Linoleic	: 59.9%
C _{18:3} Linolenic	: 0.5%
All others	: 0.1%

Typical Values:

Iodine Value	: 129
Peroxide Number	: 0
Saponification Equivalent	: 191
Smoke Point	: 440°F

Typical Components, % by Weight:

Glycerides	: 98.8%
Unsaponifiable Matter	: 1.2%
Free Fatty Acids	: 0.07%

Fuente:

http://www.mpbio.com/product_info.php?cPath=491_5_32&products_id=901414&dept h=nested&keywords=901414

ANEXOS 5

Hoja técnica de mezcla de minerales (AIN Mineral Mixture 76)

Composition:

<i>Ingredient:</i>	<i>Quantity:</i>
Calcium Phosphate Dibasic	: 500.00 gm
Sodium Chloride	: 74.00 gm
Potassium Citrate Monohydrate	: 220.00 gm
Potassium Sulfate	: 52.00 gm
Magnesium Oxide	: 24.00 gm
Manganese Carbonate (43-48% Mn)	: 3.50 gm
Ferric Citrate (16-17% Fe)	: 6.00 gm
Zinc Carbonate (70% ZnO)	: 1.60 gm
Cupric Carbonate (53-55% Cu)	: 0.30 gm
Potassium Iodate	: 0.01 gm
Sodium Selenite	: 0.01 gm
Chromium Potassium Sulfate	: 0.55 gm
Sucrose, finely powdered	: 118.00 gm

Fuente:

http://www.mpbio.com/product_info.php?cPath=491_1_12&products_id=905455&dept h=nested&keywords=905455

ANEXOS 6

Hoja técnica de mezcla de vitaminas (AIN Vitamin Mixture 76)

Composition:

Ingredients Amount

Thiamine Hydrochloride	: 0.6 gm
Riboflavin	: 0.6 gm
Pyridoxine Hydrochloride	: 0.7 gm
Nicotinic Acid	: 3.0 gm
D-Calcium Pantothenate	: 1.6 gm
Folic Acid	: 0.2 gm
D-Biotin	: 0.02 gm
Cyanocobalamin (Vitamin B ₁₂)	: 0.001 gm
Retinyl Palmitate (Vitamin A) Pre-mix (250,000 IU/gm)	: 1.6 gm
DL- α -Tocopherol Acetate (250 IU/gm)	: 20.0 gm
Cholecalciferol (Vitamin D ₃ , 400,000 IU/gm)	: 0.25 gm
Menaquinone (Vitamin K ₂)	: 0.005 gm
Sucrose, finely powdered	: 972.9 gm

Fuente:

http://www.mpbio.com/product_info.php?cPath=491_5_31&products_id=905454&dept h=nested&keywords=905454