

UNIVERSIDAD DE SONORA

**DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS QUÍMICO BIOLÓGICAS**

**Evaluación de la Calidad Proteica del Grano de Sorgo
(*Sorghum bicolor*) y Efecto de los Fitoquímicos de su
Salvado Sobre el Perfil Lipídico en Ratas
Hipercolesterolémicas**

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el título de

QUÍMICO EN ALIMENTOS

Presentan:

**Cynthia Jazmín Juvera Valenzuela
Elena Nohelí Moreno Córdova**

Hermosillo, Sonora

Octubre de 2012

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

FORMA DE APROBACIÓN

Los miembros el jurado designado para revisar la Tesis Profesional de **Cynthia Jazmín Juvera Valenzuela y Elena Nohelí Moreno Córdova**, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el título de **Químico en Alimentos**.

Dra. Ana Irene Ledesma Osuna

Director de Tesis

M. C. José Rogelio Ramos Enríquez

Secretario

Dr. Aldo Alejandro Arvizu Flores

Vocal

M. C. Rafael Canett Romero

Suplente

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad de Sonora por brindarnos la oportunidad de realizar nuestros estudios de licenciatura con una gran calidad educativa, lo cual definitivamente sabemos que nos abrirá grandes puertas en un mundo laboral y de investigación científica de prestigio.

También, agradecemos al excelente cuerpo académico del Departamento de Ciencias Químico Biológicas por habernos compartido su conocimiento y experiencia y por instruirnos en el fascinante mundo de la química.

Nuestro más profundo agradecimiento a la Dra. Ana Irene por su invaluable e incondicional apoyo para la realización de esta investigación; por su motivación e inspiración a enfocarnos a la excelencia. Nuestra más sincera admiración y respeto a su gran calidad humana. Por la confianza depositada en nosotras, muchas gracias.

De una manera especial agradecemos al M.C. Rafael Canett por su valiosa colaboración en la realización de este trabajo, por compartir sus enseñanzas y experiencia en el campo de la investigación. Por su apoyo, muchas gracias.

Le damos gracias a la Biblioteca de Ciencias Químico Biológicas por facilitarnos la excelente y valiosa literatura de la cual se sustenta el presente trabajo y al personal que labora por su disponibilidad para servir y paciencia en todo momento.

Agradecemos a nuestro comité de evaluación por el tiempo invertido y el arduo trabajo para hacer posible la realización de esta investigación.

Agradecemos a todas las personas que de alguna manera participaron con su tiempo, trabajo y apoyo en la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo de una manera muy especial a Dios, quien es el ser más importante en mi vida, sin duda el mejor padre que pudiera tener, mi mayor ejemplo a seguir y mi inspiración; Él ha permanecido fiel en todo momento, incluso en los pequeños detalles y es Él mismo quien me ayudó a realizar este trabajo dándome sabiduría, entendimiento, fortaleza y aliento.

A mi madre, quien es una gran bendición para mí, pues me ha sacado adelante y ha estado conmigo en todos mis logros, así como desvelos y cuando ya no tengo fuerzas, dándome ánimos siempre y mostrándome en todo momento su gran ejemplo de fortaleza, entereza de carácter y superación; también por enseñarme a soñar y a entender que con esfuerzo y dedicación nada es imposible.

A mis amigas y compañeras de batalla Cynthia, Ana Karenth y Sinaí por su apoyo y amistad incondicional a lo largo de mi carrera.

A mis amigos y hermanos en Cristo, por bendecir mi vida con su valiosa amistad; por alentarme, por su apoyo y cariño incondicional.

Elena Nohelí

DEDICATORIA

A Dios, que me dio la oportunidad de vivir y de regalarme una familia maravillosa.

A mis Padres, por mostrarme el camino correcto, por ser mi ejemplo entereza, por su interminable apoyo y confianza en todo momento, simplemente por ser el regalo más grande que Dios me ha brindado, este logro es para ustedes, los amo.

A mis hermanos Isaac y Melina, por ser los motorcitos de mi vida, por motivarme a ser un ejemplo para ustedes, los amo.

A Jorge, por su amor y comprensión sobre todas las cosas, por su apoyo incondicional en los momentos más difíciles de mi carrera, por motivarme en cada paso que doy, te amo. A su familia, por su inmenso cariño y apoyo, muchas gracias.

A mis Tíos Noelia, Víctor, Rafael y Lusien, por acompañarme en cada momento de mi vida, por la ayuda brindada durante mis estudios y por su interés en hacer realidad mis logros, gracias por creer en mí.

A mis Abuelos, Mamaita y Papavíctor, por su inmenso cariño, por su apoyo, sabiduría, y por encomendarme siempre a Dios.

A la familia Terán Solís, mi eterno agradecimiento por abrirme las puertas de su hogar y hacerme parte de su familia, a Belem y Helen por su inmenso cariño y amabilidad, a ustedes tíos Falita y Sergio, por estar siempre al pendiente de mí, sin su apoyo esto no hubiera sido posible.

A Elena, Ana Karenth y Sinaí, a ustedes mis amigas por atravesar conmigo este camino de la mano, por alentarme en los momentos difíciles y compartir los logros y alegrías, es un placer compartir este logro con ustedes.

A mis Amigos, Thalía, Daniel, Pepe y Roberto, gracias a ustedes las situaciones difíciles se tornaron más llevaderas, gracias a cada uno de ustedes por su amistad.

Cynthia Jazmín

CONTENIDO

	Página
LISTA DE TABLAS	6
LISTA DE FIGURAS	7
OBJETIVOS	9
Objetivo General	9
Objetivos Específicos	9
HIPÓTESIS	10
RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
ANTECEDENTES	14
Generalidades del Sorgo	14
Producción	14
Usos	15
Partes Anatómicas	15
Composición Química	16
Compuestos Fenólicos	16
Ácidos Fenólicos	18
Flavonoides	20
Taninos Condensados	23
Uso Potencial de los Compuestos Fenólicos del Sorgo como	
Antioxidantes	25
Consumo de Sorgo y Salud	25
Digestibilidad de Proteína	25
Fitoquímicos y su Impacto en la Salud Humana	27
Fibra Dietaria	28
Definición	28
Clasificación	29
Fibra Insoluble	29
Fibra Soluble	29
Composición Química de la Fibra Dietaria	29

Fuentes Alimentarias	30
Respuestas Fisiológicas ante la Fibra Dietaria	31
Formación de ácidos grasos de cadena corta	31
Capacidad de retención de agua	32
Capacidad de absorber sustancias	32
Volumen de heces	32
Motilidad colónica	33
Importancia del Consumo de Fibra Dietaria	33
Enfermedades Asociadas a la Falta de Fibra Dietaria	34
Obesidad	34
Enfermedades cardiovasculares	35
Estreñimiento	36
Cáncer de colon	36
Colesterol	37
Definición y Estructura	37
Fuentes de Colesterol	38
Importancia y Funciones del Colesterol	38
Biosíntesis de Colesterol	39
Transporte y Excreción del Colesterol	44
Enfermedades Asociadas al Aumento del Colesterol	44
Hipercolesterolemia	44
Aterosclerosis	44
Fibra Dietaria y su Efecto Sobre el Colesterol	45
Efecto de la Fibra Dietaria Sobre la Hipercolesterolemia	45
Lipoproteínas y su Relación con Colesterol	47
Composición y Función de las Lipoproteínas	47
Quilomicrones	48
Lipoproteínas de muy baja densidad (VLDL), lipoproteínas de densidad intermedia (IDL), y lipoproteínas de baja densidad (LDL)	48
Lipoproteínas de Alta Densidad (HDL)	48

MATERIALES Y MÉTODOS	49
Materia Prima	49
Decortinado y Molienda	49
Análisis Químico de Salvado y Grano Entero	49
Evaluación de Calidad Proteica	50
Animales de Experimentación	50
Grupos de Experimentación	50
Dietas Experimentales	51
Periodo Experimental	52
Indicadores de Calidad Proteica	52
Razón neta de proteína (NPR)	52
Digestibilidad de materia seca (DMS)	53
Digestibilidad aparente de nitrógeno (DAN)	53
Digestibilidad verdadera de nitrógeno (DVN)	53
Efecto de los Componentes del Salvado de Sorgo sobre el Perfil Lipídico en Ratas Hipercolesterolémicas	54
Animales de Experimentación	54
Inducción de Hipercolesterolemia	54
Grupos de Experimentación	55
Dietas Experimentales	56
Análisis del Perfil Lipídico en Suero (Colesterol Total, HDL, LDL y Triglicéridos)	56
Índice Aterogénico	58
Diseño Experimental y Estadístico	58
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
Análisis Químico Proximal	59
Humedad	59
Proteína	59
Cenizas	61
Grasa	62
Determinación de Fibra Dietaria en Salvados de Sorgo Rojo, Sorgo Blanco y Trigo	62
Determinación de Fenoles Totales en Salvados de Sorgo Rojo, Sorgo Blanco y Trigo	64

Evaluación de Calidad Proteica por Bioensayos	66
Ganancia en Peso y Razón Neta de Proteína	66
Digestibilidad de Materia Seca	70
Digestibilidad Aparente y Verdadera de Nitrógeno	70
Efecto de los Componentes del Salvado de Sorgo Sobre el Perfil	
Lipídico de Ratas con Hipercolesterolemia Inducida	72
Colesterol Total	74
Triglicéridos	79
LDL-Colesterol	80
HDL-Colesterol	82
Índice Aterogénico	86
Efecto de la Fibra Dietaria	88
Efecto de los Compuestos Fenólicos	90
Efecto de los Policosanoles y Fitoesteroles	95
CONCLUSIONES	97
RECOMENDACIONES	99
BIBLIOGRAFÍA	100

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
1.	Contenido de nutrientes del grano entero y sus fracciones	17
2.	Composición de dietas para evaluación de calidad proteica	51
3.	Composición de dietas experimentales para inducción de hipercolesterolemia	55
4.	Composición de dietas para los tratamientos sin inducción y con inducción de hipercolesterolemia	57
5.	Composición química de grano entero y salvado de sorgo rojo (SR), sorgo blanco (SB) y trigo (T)	60
6.	Fibra dietaria soluble, insoluble y total de salvados de sorgo rojo, sorgo blanco y trigo	63
7.	Valores de digestibilidad de materia seca (DMS), digestibilidad aparente de nitrógeno y digestibilidad verdadera de nitrógeno (DVN) en grano entero de sorgo rojo y sorgo blanco	69
8.	Valores promedios de los distintos parámetros analizados durante el período de prueba	74
9.	Valores promedio de los distintos parámetros observados en las dietas experimentales	75

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1.	Ácidos fenólicos derivados del ácido benzoico y del ácido cumárico reportados en sorgo	19
2.	Estructura básica de los flavonoides	20
3.	Estructuras básicas de los flavonoides más comunes	21
4.	Estructuras de flavonoides que han sido reportados en sorgo	22
5.	Estructura de tanino condensado (tipo procianidina)	23
6.	Estructura de procianidina B ₁	24
7.	Estructura del colesterol (5-colesten-3-ol)	37
8.	Biosíntesis de mevalonato. Las estatinas inhiben la HMG-CoA reductasa. Los círculos blancos y negros indican el destino de cada uno de los carbonos en la porción acetilo de la acetil CoA	41
9.	Biosíntesis de escualeno, ubiquinona, dolicol y otros derivados poliisopreno (HMG, 3-hidroxi-3-metilglutaril). El carbono marcado con un asterisco se convierte en C ₁₁ o C ₁₂ en el escualeno	42
10.	Biosíntesis de colesterol. Las posiciones numeradas son las del núcleo esteroide, y los círculos blancos y negros indican el destino de cada uno de los carbonos en la porción acetilo de la acetil-CoA	43
11.	La fibra reduce el colesterol mediante la unión de sales biliares	46
12.	Esquema de la LDL, transportador principal de colesterol a través del torrente sanguíneo	48
13.	Contenido de fenoles totales en salvados de sorgo rojo (SR), sorgo blanco (SB) y trigo (T)	65
14.	Indicadores de calidad proteica en las distintas dietas de prueba durante el bioensayo. A) Aumento en peso. B) Valores de Razón Neta de Proteína (NPR)	69
15.	Comportamiento de colesterol total con respecto al tiempo en las diferentes dietas experimentales para los tratamientos con inducción (A) y	

	sin inducción (B)õ ..õ	68
16.	Comportamiento de los triglicéridos con respecto al tiempo en las diferentes dietas experimentales para los tratamientos con inducción (A) y sin inducción (B)õ ..	81
17.	Comportamiento del LDL-colesterol con respecto al tiempo en las diferentes dietas experimentales para el tratamiento de inducciónõ õ õ õ	82
18.	Comportamiento del HDL-colesterol con respecto al tiempo en las diferentes dietas experimentales para los tratamientos con inducción (A) y sin inducción (B)õ ..	85
19.	Comportamiento del índice aterogénico con respecto al tiempo en las diferentes dietas experimentales para el tratamiento de inducciónõ õ õ õ	87

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar la calidad nutricional de la proteína del grano de sorgo (*Sorghum bicolor*) rojo y blanco, así como el efecto de los componentes de sus salvados, sobre el perfil lipídico (colesterol total, LDL-colesterol, HDL-colesterol y triglicéridos) en ratas con hipercolesterolemia inducida.

Objetivos Específicos

- 1) Caracterizar químicamente grano entero y salvado de sorgo de los tipos rojo y blanco.
- 2) Llevar a cabo evaluaciones de calidad proteica en grano entero de sorgos rojo y blanco mediante bioensayos empleando los indicadores de razón neta de proteína (NPR), digestibilidad aparente de nitrógeno (DAN), digestibilidad verdadera de nitrógeno (DVN) y digestibilidad de materia seca (DMS).
- 3) Inducir niveles elevados de colesterol en ratas utilizando dietas que aporten grasas saturadas y colesterol.
- 4) Evaluar el efecto del consumo de salvado de sorgo de los tipos rojo y blanco sobre el perfil lipídico (nivel de colesterol total, LDL-colesterol, HDL-colesterol y triglicéridos) en ratas con hipercolesterolemia inducida.

HIPÓTESIS

La calidad nutricional de la proteína del grano de sorgo (*sorghum bicolor*), variedades Silo Max y Hegari, permite la utilización de este cereal como alimento para consumo humano.

La fibra dietaria y los fitoquímicos presentes en los salvados de sorgo (Silo Max y Hegari) ejercen un efecto benéfico en la concentración de lípidos en sangre, disminuyendo los niveles de colesterol total, colesterol LDL y triglicéridos, y aumentando los niveles de colesterol HDL.

RESUMEN

El presente trabajo evalúa las propiedades funcionales de dos variedades de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] que se cultivan en el sur de Sonora, mediante la evaluación de la calidad proteica del grano y evaluación del efecto de los componentes del salvado sobre el perfil lipídico en ratas hipercolesterolémicas. Primeramente se caracterizaron químicamente las materias primas de grano entero y salvado de las dos variedades, sorgo blanco (SB) y sorgo rojo (SR) y del salvado de trigo (T) usado como control. Se incluyeron las determinaciones de humedad, cenizas, proteína, grasa y fibra dietaria en base a los métodos propuestos por la AACC (1999). Fenoles totales se determinaron de acuerdo al método de Folin-Ciocalteu descrito por Kaluza *et al.* (1980). Para evaluar la calidad proteica se realizó un bioensayo con ratas tipo Sprague-Dawley utilizando los indicadores, razón neta de proteína (NPR), digestibilidad de materia seca (DMS), digestibilidad aparente (DAN) y verdadera de nitrógeno (DVN). Para la evaluación de los componentes del salvado sobre perfil lipídico en ratas con hipercolesterolemia inducida, se realizó un bioensayo utilizando 44 ratas tipo Wistar, las cuales se dividieron en dos grupos, con inducción (CI) y sin inducción (SI), según su tratamiento, monitoreando sus lípidos sanguíneos, colesterol total (CT), triglicéridos (TG), HDL-colesterol (HDL) y LDL-colesterol (LDL). Se llevó a cabo la inducción de hipercolesterolemia durante siete semanas mediante la administración de una dieta alta en grasas saturadas (15%) y colesterol (1%). Posteriormente se formularon dietas experimentales utilizando la fracción de salvado de SB y SR, se calculó además el índice aterogénico. Los resultados obtenidos fueron, fenoles totales SR (9.29 mgEAG/g), SB (3.56 mgEAG/g) y T (1.40 mgEAG/g). Indicadores de calidad proteica, NPR, SR (2.27), SB (1.99) y control caseína (CAS) (3.84). DMS, SR (90.24%), SB (93.59%) y CAS (93.59%). DAN, SR (73.41%), SB (84.44%) y CAS (88.69%). DVN, SR (77.83%), SB (88.93%) y CAS (91.36%). Los valores de inducción fueron, para el tratamiento CI, CT (159.10 mg/dl), TG (48.40 mg/dl), HDL (50.60 mg/dl) y LDL (98.81 mg/dl), para el tratamiento SI, CT (94.02 mg/dl), HDL (76.51 mg/dl), LDL (3.43 mg/dl) y TG (70.36 mg/dl). De manera general, después de la administración de las dietas de prueba se obtuvo una disminución del CT, TG, LDL e IA y un aumento de HDL. Esos resultados sugieren que las variedades de sorgo estudiadas son potencialmente utilizables como alimento para consumo humano, tanto para personas sanas como las que presenten hiperlipidemia. Asimismo, la fracción de salvado es rica en fibra y fitoquímicos, valiosos componentes que ofrecen oportunidades prometedoras para combatir enfermedades cardiovasculares.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] ocupa el quinto lugar en producción, siendo superado solo por el arroz, trigo, maíz y cebada. Este cereal es ampliamente usado en Asia y África como alimento para consumo humano, a diferencia de Estados Unidos y América Latina donde se usa principalmente para consumo animal (Hahn y Rooney, 1984).

En México, la importancia de la producción de sorgo dentro del grupo de cultivos básicos, radica principalmente en que se utiliza como materia prima para la industria de alimentos balanceados para aves, porcinos, bovinos, entre otros, que a su vez son importantes fuentes proveedoras de alimentos para consumo humano (Situación Actual y Perspectiva de la Producción de Sorgo en México 1992-2004).

Desde el punto de vista genético, este cultivo se adapta bien a un entorno agroecológico cálido y seco en el que resulta difícil cultivar otros cereales alimentarios, es decir, a regiones con muy poca agua o sequía (FAO, 1995); motivo por el cual, se están implementando programas de apoyo al campo, que promueven el cultivo de este cereal no solo para elaborar alimento para el ganado, sino también para la producción de etanol, harinas, forraje y alimento humano (INIFAP, 2010).

Nutricionalmente, las características del sorgo son análogas a las de otros cereales. Proporciona prácticamente la misma energía metabolizable que el maíz. Tiene un mayor contenido de almidón y proteína bruta (aunque de menor calidad) que el maíz, aunque este último es más alto en lípidos.

El sorgo es relativamente rico en niacina, que es una vitamina esencial. Las proteínas del sorgo son en general, altas en los aminoácidos, leucina, ácido glutámico, alanina, prolina y ácido aspártico, siendo lisina, metionina y triptófano los más limitantes (Domansky *et al.*, 1997). Poseen además un alto contenido de compuestos polifenólicos.

Son estos constituyentes, lo que hacen a este cereal atractivo para su aprovechamiento en otros ámbitos, como lo es la molienda húmeda para la obtención de almidones. El almidón refinado y los productos manufacturados a partir de él son unos de los ingredientes funcionales más solicitados en distintos segmentos de la industria alimentaria (Serna-Saldívar, 1996).

Asimismo, Awika *et al.* (2004) reportaron contenidos de hasta 45% de fibra dietética total presente en el salvado de sorgo y lo cual representa hasta el 11% del grano entero. Además estas fracciones presentaron una actividad antioxidante importante, a la cual se le han atribuido efectos benéficos contra trastornos neurológicos, además de ejercer efectos anticancerígenos, antimutagénico, y cardioprotectoras vinculados a su actividad de atrapar radicales libres.

Esta actividad antioxidante es debida a la presencia de compuestos polifenólicos, los cuales son metabolitos secundarios de las plantas y se encuentran presentes en el sorgo en forma de ácidos fenólicos, flavonoides y taninos (Hanh *et al.*, 1984). Todos los sorgos contienen ácidos fenólicos y flavonoides; algunas variedades de sorgo contienen además antocianidinas, las cuales dan una pigmentación roja al pericarpio (Nip y Burns, 1969). Algunas variedades de sorgo tienen también taninos condensados, denominados proantocianidinas (Gupta y Haslam, 1978).

Debido a la gran cantidad de compuestos polifenólicos presentes en el pericarpio del grano de sorgo, cuando este cereal es destinado a consumo humano, generalmente es sujeto a un proceso de molienda para la remoción del pericarpio y germen antes de ser procesado en alimentos. Lo resultante es un grano perlado o decorticado con menor cantidad de aceite, fibra y cenizas. La cantidad removida por abrasión o durante el proceso de decorticación fluctúa entre 15-30% (Serna-Saldívar, 1996). Este subproducto, obtenido por molienda seca de sorgo, es rico en fibra dietética, vitaminas, minerales y compuestos polifenólicos que pudieran ser utilizados como ingredientes en la formulación de alimentos.

La alta incidencia de problemas de salud asociados a la nutrición, requiere de alternativas de consumo que aporten no solo nutrientes sino compuestos que ejerzan efectos benéficos para la salud. El sorgo, por contener alto contenido de fitoquímicos (compuestos fenólicos y fibra dietética principalmente) presenta un potencial de utilización en dietas para consumo humano. Por lo tanto, es esencial explorar tecnologías de procesamiento que permitan utilizar eficientemente estos componentes, para producir alimentos saludables y sean organolépticamente aceptables para los consumidores.

ANTECEDENTES

Generalidades del Sorgo

El sorgo pertenece a la familia de las gramíneas y ha sido, durante mucho tiempo, un alimento básico importante en las zonas tropicales semiáridas de África (Kimber, 2007). El sorgo, como todos los cereales, está compuesto de tres partes principales: salvado, germen y endospermo. El endospermo forma la mayor parte del grano y contiene proteínas y almidón. El germen contiene el embrión de la planta y por ello es la parte donde la nueva planta brota. El salvado está conformado por la testa (no todos los sorgos la presentan), que es la envoltura de la semilla, y el pericarpio. La fracción del salvado es rica en fitoquímicos, fibra, vitaminas, minerales y nutrientes localizados en el pericarpio (Slavin, 2007).

El grano varía en el color que va desde el blanco a tonalidades oscuras de rojo y pardo, pasando por el amarillo pálido, hasta pardo púrpura profundo. Los colores más comunes son el blanco, el bronce y el pardo. Los granos son por lo general esféricos, pero varían en dimensión y forma. La cariopsis puede ser redondeada y con puntas romas, de 4-8 mm de diámetro (Purseglove, 1995).

Producción

El sorgo es uno de los cinco principales cereales más producidos en todo el mundo, junto con el maíz, trigo, arroz y cebada. El principal país productor de sorgo es Estados Unidos. En el Ciclo Agrícola 2007/08 reportó una producción de 12.63 millones de toneladas, aproximadamente el doble de producción que México (6.20 millones de toneladas). El segundo país productor es Nigeria con un volumen de 10 millones de toneladas anuales, seguido de India con 7.8 millones. México es el cuarto productor mundial con una participación del 10% de la producción mundial. En la región de América Central y el Caribe, la producción está dominada por México con 90% de la producción regional total. Tamaulipas y Guanajuato son los principales estados en producción a nivel nacional, en conjunto aportan el 61% de la producción total nacional, lo que

equivale a 3.8 millones de toneladas. Sinaloa es el tercer lugar en producción con un volumen de 0.61 millones de toneladas, seguido de Michoacán con 0.50 millones y Nayarit con un volumen de 0.30 millones de toneladas (Financiera Rural, 2009).

Usos

En el Hemisferio Oeste, este cereal es usado principalmente como alimento para ganado, y no ha sido considerado un ingrediente significativo en alimentos (Awika y Rooney, 2004). El sorgo ha sido ampliamente consumido por los humanos en los países en desarrollo (FAOSTAT, 2007) desde hace miles de años y actualmente, en muchas poblaciones en África e India se consume en varios platillos tradicionales, incluyendo papillas, panes fermentados, productos tipo arroz como el llamado cuscús, bebidas alcohólicas y no alcohólicas, botanas y muchos productos horneados (Awika y Rooney, 2004); sin embargo, se destina principalmente para el consumo animal, que es el principal impulsor para la producción mundial (FAOSTAT, 2007). Estados Unidos, México y Japón son los principales países consumidores, seguidos por Argentina, los territorios que fueron de la Unión Soviética y Venezuela. Estos países absorben conjuntamente más del 80% de la utilización mundial de sorgo en forma de pienso (FAO, 1995).

Partes Anatómicas

La molienda de los granos de sorgo para producir harina es una de las principales operaciones unitarias en el procesamiento de este cereal. Uno de los objetivos primordiales de la molienda es separar los componentes principales del grano, que son el pericarpio, endospermo y germen, lo más limpiamente posible (Hoseney, 1994; Kent y Evers, 1994; FAO/ICRISAT, 1996). El salvado (principalmente pericarpio y una parte del germen) que resulta del proceso de molienda es a menudo descartado como un producto de desecho (Sikwese, 2005).

A pesar de que el sorgo no ha sido estudiado extensivamente como una fuente de antioxidantes naturales, algunos salvados de sorgo negro y marrón han mostrado tener una alta actividad antioxidante, relativa a frutas como uvas, ciruelas y fresas (Awika y Rooney, 2004). El

salvado de sorgo que contiene aproximadamente 10% de fenoles totales podría ser considerado como una fuente potencial de compuestos fenólicos (Waterman y Mole, 1994).

Composición Química

En la Tabla 1 se puede observar que el salvado es bajo en proteína y ceniza, y rico en componentes fibrosos. La fracción del germen es rica en ceniza (68% del total), proteína (15%), aceite (75%) y vitaminas del complejo B, pero muy pobre en almidón. El endospermo, que es la parte mayor del grano, es relativamente pobre en mineral, ceniza y contenido oleaginoso; en cambio, es un gran aportador de otros componentes pues contribuye al 80% de la proteína, al 94% del almidón y al 50-70% de las vitaminas del complejo B del grano entero (FAO, 1995).

En el sorgo, la variabilidad en contenido de proteína es grande debido a que este cereal se cultiva en situaciones agroclimáticas diversas que influyen en la composición del grano (Burlison *et al.*, 1995; Waggle *et al.*, 1995; Deosthale *et al.*, 1995). Las fluctuaciones en el contenido proteico del grano van acompañadas por lo general de cambios en la composición aminoácida del grano y su proteína (Waggle *et al.*, 1995).

Compuestos Fenólicos

Una manera general de clasificar al sorgo es la basada en su apariencia y fenoles totales extraíbles; así tenemos sorgos blancos (también llamados tipo alimento) sin taninos o antocianinas detectables y muy bajos niveles de fenoles totales extraíbles; sorgos rojos que no contienen taninos pero sí poseen pericarpio rojo con niveles significativos de fenoles extraíbles; sorgos negros con un pericarpio negro y muy altos niveles de antocianinas, y los

Tabla 1. Contenido de nutrientes del grano de sorgo entero y sus fracciones.

Fracción del grano	Peso en el grano (%)	Proteína (%)	Ceniza (%)	Aceite (%)	Almidón (%)	Niacina (mg/100g)	Riboflavina (mg/100g)	Piridoxina (mg/100g)
Grano entero	100	12.3	1.67	3.6	73.8	4.5	0.13	0.47
Endospermo	82.3	12.3	0.37	0.6	82.5	4.4	0.09	0.40
Germen	9.8	18.9	10.4	28.1	13.4	8.1	0.39	0.72
Salvado	7.9	6.7	2.0	4.9	34.6	4.4	0.40	0.44

(FAO, 1995)

sorgos marrón que poseen una testa pigmentada y contienen niveles significantes de taninos, con niveles variantes de pigmentación del pericarpio (Awika y Rooney, 2004).

El sorgo contiene varios fitoquímicos (incluyendo compuestos fenólicos, esteroides y policosanoles) que son metabolitos secundarios de la planta o componentes integrales de las células (Awika y Rooney, 2004). Los compuestos fenólicos en el grano de sorgo pueden ser clasificados, en sentido amplio, en ácidos fenólicos, flavonoides y taninos condensados, estos últimos, solo se encuentran presentes en variedades con testa pigmentada (Sikwese, 2005). Los fenoles en los sorgos se encuentran dentro de dos principales categorías: ácidos fenólicos y flavonoides. Los ácidos fenólicos son derivados de los ácidos benzoico o cinámico (Hahn *et al.*, 1983; Waniska *et al.*, 1989), mientras que los flavonoides incluyen a las antocianinas como los principales componentes aislados del sorgo hasta la fecha (Gupta y Haslam, 1978; Gujer *et al.*, 1986; Gu *et al.*, 2002; Krueger *et al.*, 2003). Los sorgos varían ampliamente en su contenido y composición fenólica, afectando tanto la genética, tipo y nivel de compuestos fenólicos (Awika y Rooney, 2004).

Los compuestos fenólicos poseen un anillo aromático que tiene uno o más sustituyentes hidroxilo (OH). El sorgo contiene compuestos fenólicos que tienen propiedades antioxidantes, y proporcionan un papel protector a la planta de sorgo, Awika *et al.* (2004) reportaron actividades antioxidantes del sorgo, tanto en el salvado como productos horneados y extruidos debido a los compuestos fenólicos (Sikwese, 2005).

Ácidos Fenólicos

Los ácidos fenólicos son los compuestos fenólicos más simples, derivados de los ácidos benzoico o cinámico (Figura 1), contienen grupos hidroxilo o metoxilo sustituidos en varias posiciones en el anillo aromático, Waniska *et al.* (1989) identificaron a los ácidos protocatéquico, gentísico, cafeico, -cumárico, salicílico, ferúlico, sinápico y cinámico como los ácidos fenólicos más importantes presentes en el grano de sorgo, y a los ácidos -hidroxibenzoico, vanílico y siríngico como los de menor importancia. Por otro lado, Hahn *et al.* (1983) separaron e identificaron por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), ocho ácidos fenólicos principales en los extractos de granos de sorgo blanco y café, los ácidos gálico,

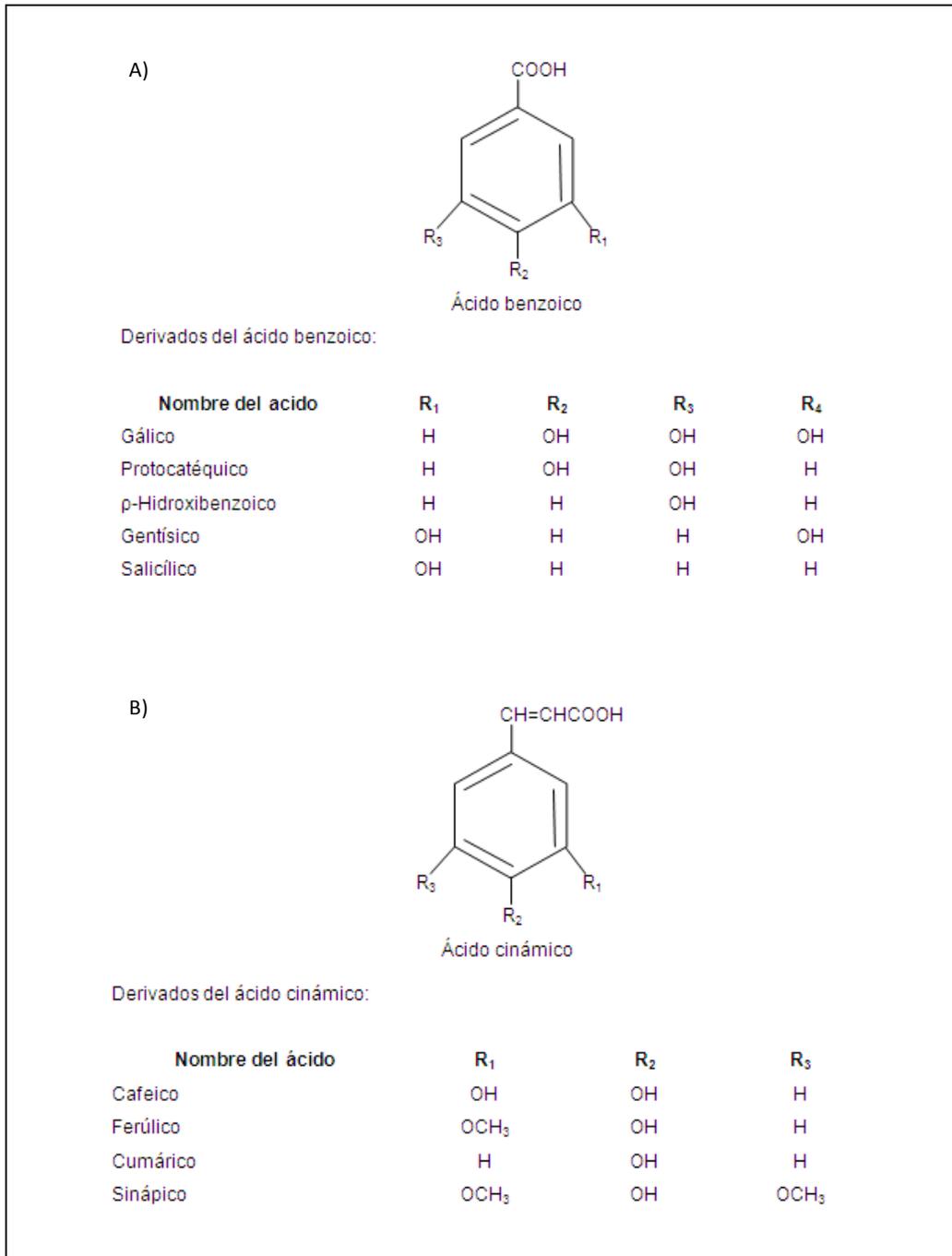


Figura 1. A) Ácidos fenólicos derivados del ácido benzoico reportados en sorgo.
 B) Ácidos fenólicos derivados del ácido cumárico reportados en sorgo.

Fuente: Sikwese, 2005.

protocatéquico, p-hidroxibenzoico, vanílico, cafeico, -cumárico, ferúlico y cinámico (Sikwese, 2005).

Estos ácidos fenólicos se encuentran tanto en forma libre como ligada, siendo el sorgo pardo el que contiene la mayor cantidad de ácidos fenólicos libres (Sikwese, 2005). Los ácidos fenólicos que se encuentran enlazados son aquellos que son conjugados o complejados con azúcares, proteínas o polisacáridos de la pared celular, Waniska *et al.* (1989) también concluyeron que las variedades de sorgo blanco sin testa pigmentada contienen la menor cantidad de ácidos fenólicos (Sikwese, 2005).

Flavonoides

Los flavonoides son los fenoles de mayor presencia en el reino vegetal y son metabolitos con un núcleo benzopireno que tiene un sustituyente aromático en el carbono 2 (C₂) del anillo C (Sikwese, 2005). La Figura 2 muestra la estructura básica de los flavonoides.

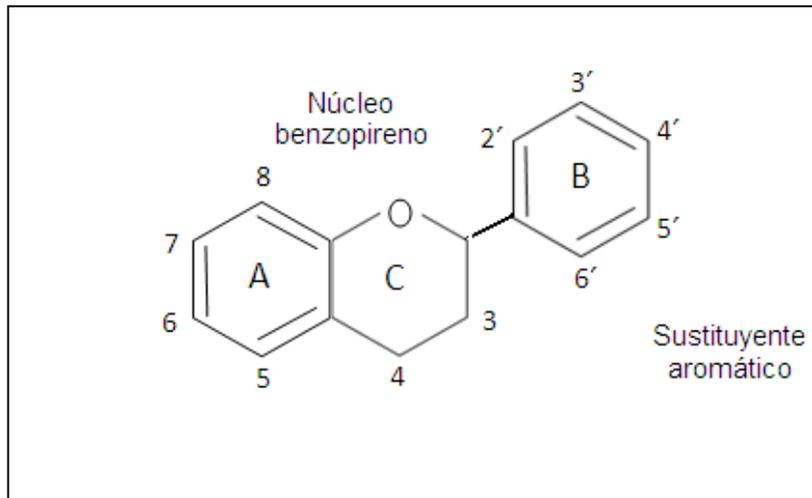


Figura 2. Estructura básica de los flavonoides.

Fuente: Sikwese, 2005.

Los tipos más comunes de flavonoides son flavanonas, flavonoles, flavonas y flavanos. Como se muestra en la Figura 3, lo que diferencia a estos flavonoides son un grupo carbonilo en C₄ (flavanonas), un grupo carbonilo en C₄, doble enlace entre C₂ y C₃, un hidroxilo en C₃ (flavonoles), un grupo carbonilo en C₄ y doble enlace entre C₂ y C₃ (flavonas), en el caso de los flavanos, no poseen un grupo carbonilo en C₄, pero en el C₃ se encuentra un hidroxilo (Sikwese, 2005).

Entre los tipos de flavonoides que existen en la naturaleza, los que se encuentran principalmente en el sorgo son los flavanos, principalmente, leucoantocianidinas (hidroxilo en C₃ y C₄), catequina (hidroxilo en C₃) y antocianidinas (hidroxilo en C₃, doble enlace entre C₃ y C₄). Antocianidinas como la luteolinidina, cianidina y apigeninidina han sido reportados en sorgo. Awika *et al.* (2004) identificaron en sorgos negros y cafés, apigeninidina, luteolinidina y como el principal, 3-deoxiantocianidina (antocianidina que carece de grupo hidroxilo en C₃) (Sikwese, 2005).

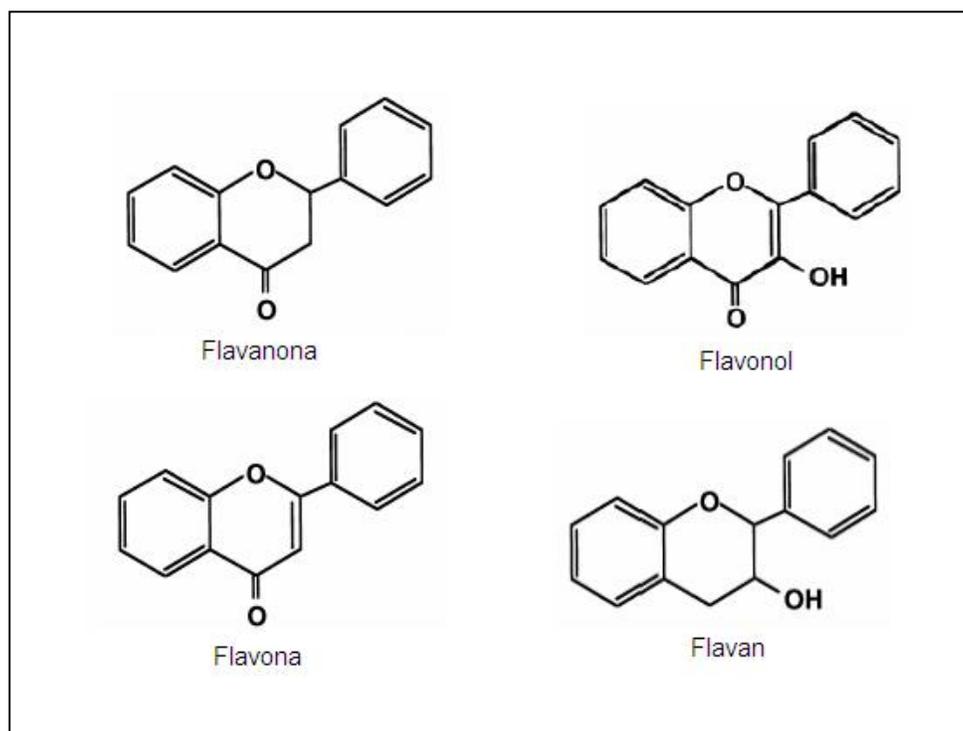


Figura 3. Estructuras básicas de los flavonoides más comunes.

Fuente: Sikwese, 2005.

Las antocianinas se encuentran en el sorgo en un rango de 1.6-9.8 mg/g. Otros flavonoides reportados en sorgo incluyen naringenina, taxifolina (flavonol), apiforol (flavan-4-ol) y luteolina (flavona), esto muestra que existe una amplia variación en la composición de flavonoides entre las variedades de sorgo. Algunos de los principales flavonoides que se encuentran en el sorgo se muestran en la Figura 4. Los flavonoides pueden sufrir modificaciones tales como la pérdida de los sustituyentes de oxígeno, metilación, glucosilación, dimerización o polimerización, pudiendo afectar sus propiedades (Sikwese, 2005).

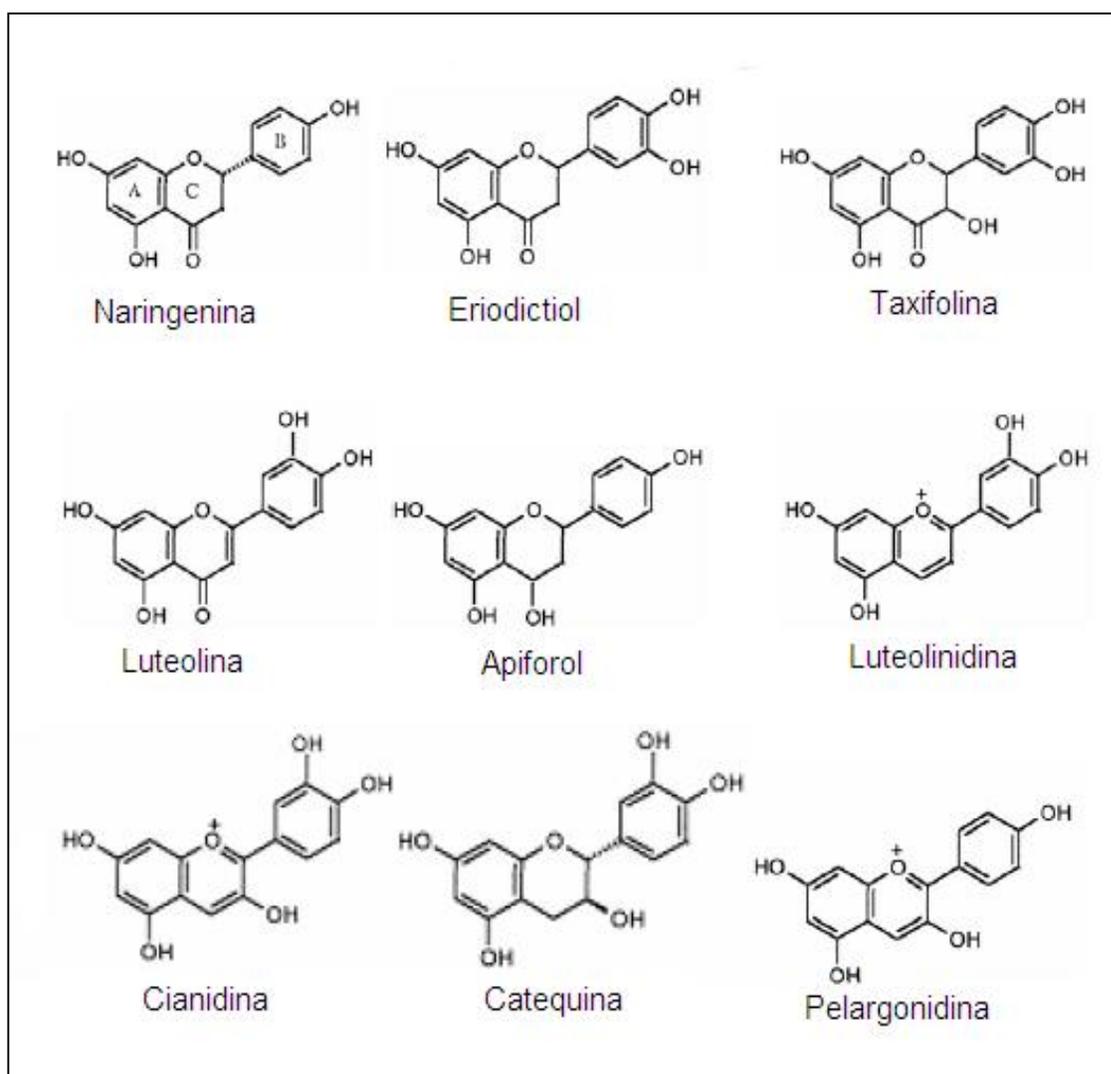


Figura 4. Estructuras de flavonoides que han sido reportados en sorgo.

Fuente: Sikwese, 2005.

Taninos Condensados

En la naturaleza han sido identificados tres tipos de taninos, florotaninos, taninos hidrolizables y taninos condensados y cada uno de ellos provienen de fenoles simples. Los taninos condensados son los únicos taninos que han sido identificados en sorgo, en las variedades de sorgo altos en taninos se ha encontrado una mayor cantidad de compuestos fenólicos. Los taninos condensados (Figura 5) son polímeros formados por unidades de flavan-3-ol conectadas por enlaces carbono-carbono entre las subunidades de flavonoles (Sikwese, 2005).

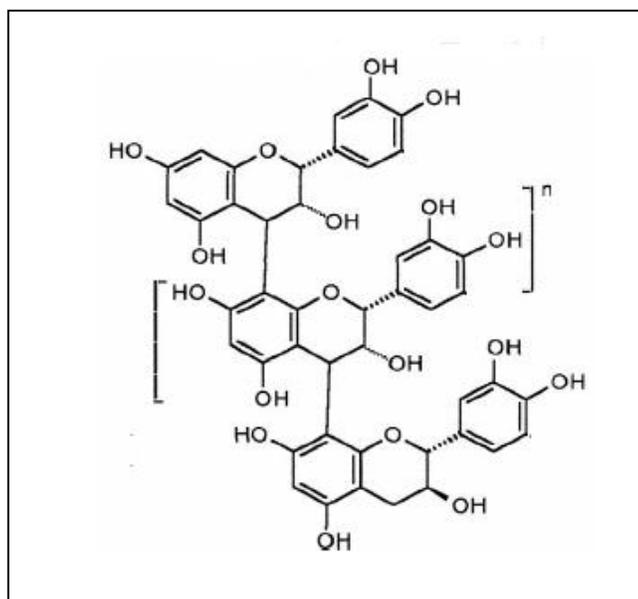


Figura 5. Estructura de tanino condensado (tipo procianidina), $n = 1 > 10$.

Fuente: Sikwese, 2005.

Estos taninos también son denominados proantocianidinas debido a la habilidad de los oligómeros flavan-3-ol para despolimerizar y producir pigmentos monoméricos de antocianidina (cianidina) en ácidos fuertes. Los taninos presente en el salvado de sorgo marrón están formados por unidades de epicatequina y catequina. El monómero de catequina y el dímero B1 procianidina (Figura 6) son los más comunes reportados en el sorgo (Sikwese, 2005).

Los taninos son los responsables de la astringencia de algunos vegetales y se sabe que interactúan y precipitan las proteínas, por lo tanto, disminuyen el valor nutritivo cuando están presentes en la dieta. Debido a sus propiedades de unión a proteínas, los taninos también pueden inactivar enzimas. Los taninos contribuyen a los sabores ácido, amargo y astringente. Todas las variedades de sorgo contienen ácidos fenólicos y la mayoría contienen flavonoides, mientras que sólo los sorgos altos en taninos y las variedades ave-resistentes contienen taninos condensados (Sikwese, 2005).

La mayoría de los compuestos fenólicos en el sorgo se concentran en las capas exteriores del grano. Las cantidades más altas de compuestos fenólicos (10 a 100 veces más) han sido reportadas en el pericarpio, glumas y vainas de las hojas. Hahn y Rooney (1986) también informaron de cantidades insignificantes de fenoles extraíbles en el endospermo (Sikwese, 2005).

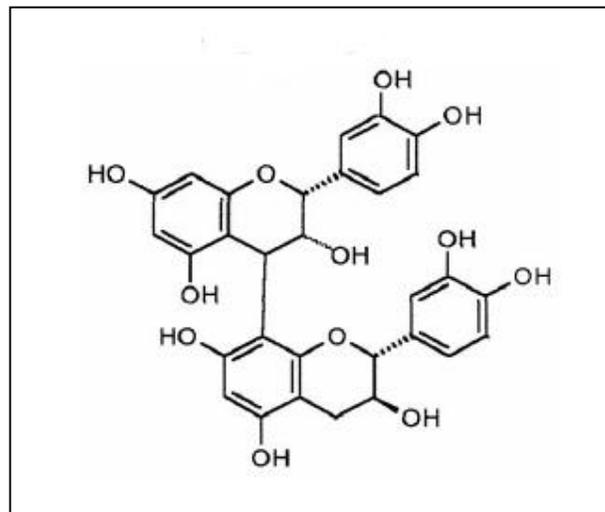


Figura 6. Estructura de procianidina B₁.

Fuente: Sikwese, 2005.

Uso Potencial de los Compuestos Fenólicos del Sorgo como Antioxidantes

Los compuestos fenólicos del sorgo y provenientes de extractos fenólicos de varias fuentes vegetales como tomates, ajo, jengibre, semillas de girasol, te y semillas de colza han demostrado que tienen actividades antioxidantes, esto promueve el uso potencial de los compuestos fenólicos del sorgo como antioxidantes. Se ha reportado que las flavanonas y antocianinas también poseen actividad antioxidante. El salvado de sorgo es rico en fenoles, por lo tanto, puede ser considerado fuente potencial de antioxidantes naturales para su uso, por ejemplo, en alimentos que contengan alto porcentaje de lípidos, tales como los aceites comestibles para retrasar los procesos de oxidación y aumentar su vida útil (Sikwese, 2005).

A pesar de los altos niveles y la diversidad de fitoquímicos presentes en el sorgo, las investigaciones sobre este cultivo como una fuente importante de compuestos promotores de la salud sigue siendo limitada respecto a otros productos como por ejemplo, frutas y vegetales. Como resultado de ello, la utilización de las fracciones del sorgo en alimentos para mejorar la nutrición es muy limitada. El sorgo tiene un gran potencial, dado por sus propiedades agronómicas, así como por la reciente evidencia en los efectos biológicos de los fitoquímicos presentes en el grano (Awika y Rooney, 2004).

Consumo de Sorgo y Salud

Digestibilidad de Proteína

Una limitación a la utilización del sorgo como alimento es la baja digestibilidad de las proteínas de sorgo, estudios *in vivo* (MacLean *et al.*, 1981) y estudios *in vitro* (Axtell *et al.*, 1981) indican que las proteínas de sorgo son mucho menos digestibles que las proteínas de otros cereales como el trigo y el maíz (Kwaku, 2000).

Además de su perfil de aminoácidos esenciales, la fácil digestibilidad es una característica importante para que una proteína sea considerada de buena calidad. Se ha observado una gran variabilidad en la composición de la proteína del sorgo en cuanto a

aminoácidos esenciales (Hulse *et al.*, 1980; Jambunathan, 1984). Los métodos biológicos basados en mediciones del crecimiento y de la retención de nitrógeno evalúan la calidad nutricional de la proteína. Estos métodos comprenden la determinación de la relación de eficiencia de las proteínas (NPR), la utilización neta de proteínas (UNP), el valor biológico (VB) y la digestibilidad real de la proteína (Kwaku, 2000). Estudios tanto *in vitro* como *in vivo* han demostrado una amplia variabilidad en la digestibilidad proteica de las variedades de sorgo (Axtell *et al.*, 1981). Para las distintas variedades de sorgo se han señalado valores que van del 49.5 al 70 % (Nawar *et al.*, 1970) y del 30 al 70% (Sileno, 1977).

Elmalik *et al.* (1986) observaron en ratas que la digestibilidad de la proteína de las variedades de sorgo fue del 70.3 y 74.5%, valor inferior al observado para la proteína del maíz (78.5%). En algunas variedades de sorgo, los polifenoles condensados como los taninos constituyen otro factor que influye desfavorablemente en la digestibilidad de la proteína y aminoácidos disponibles (Bach *et al.*, 1988; Whitaker y Tanner, 1989).

En las variedades de sorgo sin taninos, Sikabbubba (1989) observó que la digestibilidad de la proteína guarda una correlación inversa con la proteína total del grano. Estudios en seres humanos realizados por Kurien *et al.* (1960) en niños de 10-11 años de edad, mostraron que una sustitución progresiva del arroz por sorgo, producía una disminución progresiva de la digestibilidad de la proteína, que pasa del 75 al 55% y en una retención manifiesta del nitrógeno del 4.5% al 2.1% (Kwaku, 2000).

Así pues, la digestibilidad de la proteína en el grano de sorgo resultó ser muy escasa frente a la del trigo (81%), maíz (73%) y arroz (66%) observada en estudios realizados anteriormente; sin embargo, en estudios realizados posteriormente por MacLean *et al.* (1983), en niños de corta edad alimentados con productos de sorgo descortezado y extruidos, se registraba una gran mejora en la digestibilidad de la proteína, que pasaba del 46 al 81% y la cantidad de nitrógeno retenido en una dieta a base de sorgo de grano entero se reforzaba del 14 al 21% (FAO, 1995). La digestibilidad proteica del sorgo ha sido objeto de numerosas investigaciones y muchos estudios *in vivo* e *in vitro* se siguen llevando a cabo.

Fitoquímicos y su Impacto en la Salud Humana

El consumo de granos enteros está asociado al decremento en la incidencia de enfermedades o sucesos cardiovasculares (ECV). Las recomendaciones de dieta y estilo de vida del 2006 hechas por la Asociación Americana del Corazón (American Heart Association) establecen que una dieta rica en granos enteros puede disminuir el riesgo a ECV y que la mitad del consumo de granos debe consistir en granos enteros (Jacobs *et al.*, 2001; Jensen, 2004; Liu, 2000; Steffen, 2003; Lichtenstein, 2006).

La disminución del colesterol y el mejoramiento de la respuesta de la glucosa están asociados con los efectos de la fibra soluble (Slavin, 2007), sin embargo, la hipótesis de la fibra no ha sido bien probada en la contabilización de los beneficios que proveen los granos enteros. Anderson (2007) demostró que los efectos protectores de los granos enteros sobre las ECV son independientes de la fibra, y sugieren que otros componentes presentes en la fracción del salvado y germen tienen efectos biológicos importantes. Los granos enteros contienen muchos compuestos antioxidantes, los cuales incluyen vitaminas liposolubles e hidrosolubles, vitamina E, ácidos fenólicos y fitoestrógenos, los cuales pueden considerarse para otros mecanismos por los cuales el consumo de granos resulta benéfico para la salud humana (Slavin, 2007).

Algunas variedades de sorgo tienen concentraciones considerablemente más altas de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante que están localizados principalmente en la fracción del salvado del grano, el contenido de estos compuestos varía extremadamente entre las diferentes variedades de sorgo (Burdette, 2007).

El sorgo no ha sido estudiado extensivamente como una fuente de antioxidantes naturales, algunos salvados de sorgo negro y café han mostrado tener una alta actividad antioxidante, relativa a frutas como uvas, ciruelas y fresas (Awika y Rooney, 2004). El salvado de sorgo que contiene aproximadamente 10% de fenoles totales y podría ser considerado como una fuente potencial de compuestos fenólicos (Waterman y Mole, 1994).

Los estudios *in vivo* sobre los efectos de sorgo en las enfermedades cardiovasculares son escasos, Klopfenstein *et al.* (1981) reportaron una reducción de colesterol en conejillos de indias cuando se les administró una dieta con 58% de sorgo con bajo contenido de taninos, este efecto fue mayor que el producido por el trigo, avena o el mijo perla (FAO, 1995).

Rooney *et al.* (1992) observaron que cuando el salvado de sorgo fue agregado a dietas de ratas, hasta lograr un 6% de fibra, tanto el sorgo alto en taninos como el libre de taninos, así como el salvado de trigo aumentó el colesterol total en suero en las ratas, sin embargo no se midieron los cambios de colesterol HDL y LDL (Awika y Rooney, 2004).

Es evidente que es necesaria más información sobre como las diversas variedades de sorgo afectan el metabolismo del colesterol, en animales de experimentación. Los compuestos fenólicos muestran que el sorgo es una fuente importante de fitoesteroles y policosanoles (Dalton y Mitchell, 1959; Seitz, 1977; Avato *et al.*, 1990; Singh *et al.*, 2003) por lo que resulta necesario evaluar si estos componentes pudieran ejercer un efecto benéfico para la salud (Awika y Rooney, 2004).

Fibra Dietaria

Definición

Con el nombre de fibra se designa a un grupo muy amplio de polisacáridos, de los considerados estructurales, que no son aprovechados metabólicamente por los organismos monogástricos, incluyendo al hombre (Badui, 1993).

En 2001, la AACC (American Association of Cereal Chemists) adoptó la siguiente definición: **Fibra dietaria** es la parte comestible de las plantas o carbohidratos análogos que son resistentes a la digestión y absorción en el intestino delgado humano con la completa o parcial fermentación en el intestino grueso. La fibra dietaria incluye polisacáridos, oligosacáridos, lignina y sustancias asociadas, promueve efectos benéficos fisiológicos incluyendo laxación, control de colesterol, control de la glucosa en la sangre, entre otros (Van der Kamp *et al.*, 2004).

Clasificación

Con base en sus propiedades físicas y su efecto fisiológico en el organismo, la fibra dietaria se clasifica en fibra insoluble y fibra soluble (Silveira *et al.*, 2003).

Fibra insoluble. La fibra insoluble engloba a la celulosa, hemicelulosas y ligninas (Silveira, 2003), que no se disuelven de forma principal en agua y no suelen metabolizarse por bacterias en el intestino grueso, debido a esto se denominan fibras poco fermentadas. Como acciones funcionales se le atribuyen, el incremento del bolo fecal y el estímulo de la motilidad intestinal; la mayor necesidad de masticado, relevante en las modernas sociedades víctimas de la ingesta compulsiva y la obesidad (Mardlaw *et al.*, 2004).

Fibra soluble. La fibra soluble está representada fundamentalmente por pectinas, gomas, mucílagos y algunas hemicelulosas; su principal característica es su capacidad para atrapar agua y formar geles viscosos, lo que determina su poder laxante, son metabolizadas (fermentadas) por las bacterias en el intestino grueso (Silveira *et al.*, 2003).

Ambos tipos de fibras se encuentran en proporciones variables en los alimentos, aunque de forma genérica puede decirse que la insoluble predomina en los cereales enteros, mientras que la soluble abunda en frutas, vegetales y tubérculos (Silveira *et al.*, 2003).

Composición Química de la Fibra Dietaría

La mayor parte de los componentes de la fibra son polisacáridos como celulosa, hemicelulosas, pectinas, carrageninas, gomas, mucílagos, almidón resistente, aunque también existen algunos compuestos que no son polisacáridos como la lignina. Las unidades básicas de éstos polisacáridos son la glucosa, la fructosa y otros monosacáridos (hexosas y pentosas), algunos de estos compuestos se encuentran en la pared celular de los vegetales y forman parte del cemento intracelular, otros son secretados por el vegetal en respuesta a una herida y otros previenen de la desecación de semillas (Badui, 1993).

La celulosa es un polisacárido lineal de glucosa con uniones beta 1-4, es el principal componente estructural de la pared celular y se considera relativamente insoluble. Los animales monogástricos, entre ellos el hombre, no son capaces de digerir la celulosa por carecer de las enzimas celulasas correspondientes (Badui, 1993). La hemicelulosa está conformada por grupo muy extenso de polisacáridos con diversos tipos de monómeros (heteropolisacáridos) que se localizan principalmente en la pared celular y que son muy distintos a la celulosa o al almidón. Su composición química está basada en la unión glucosídica de distintos monosacáridos, sobre todo pentosas (arabinosa y xilosa), hexosas (glucosa, manosa y galactosa), ácidos urónicos (galacturónico y glucurónico) y algunos desoxi-azúcares. El trigo contiene de 2 a 3% de hemicelulosa y una fracción de ésta (0.5 a 0.8%) es de peso molecular bajo y soluble en agua, mientras que la otra es de peso molecular alto e insoluble. Se considera que alimentos que contienen hemicelulosa forman grandes volúmenes de bolo que ayudan a efectuar la defecación más fácilmente (Badui, 1993).

Las pectinas están compuestas principalmente por ácidos D- galacturónico; sin embargo, pueden tener otros carbohidratos unidos a ella. La lignina es el principal componente no carbohidrato de la pared celular de las plantas (Miranda, 2006), no es un polisacárido sino un polímero altamente complejo con estructura tridimensional que contiene unidades de fenilpropano; forma parte de la fracción insoluble de la fibra dietaria y su contenido aumenta con la madurez del vegetal (Olds, 1986), tiene mínima capacidad para absorber agua.

La composición de la fibra dietaria también incluye gomas y mucilagos secretados por las células y polisacáridos tales como carragenina. Las gomas y mucilagos son polisacáridos heterogéneos, formados por diferentes azúcares y en general llevan ácidos urónicos. Entre sus propiedades se encuentran la capacidad de formar geles, además se disuelven fácilmente formando soluciones viscosas. En general son polisacáridos ramificados, puede llevar grupos metoxilo, y en la goma arábica pueden aparecer en forma de sales (Ink y Hurt, 1987).

Fuentes Alimentarias

La fibra sólo se encuentra en productos vegetales: frutas, verduras, nueces y granos integrales; debido a su gran contenido de agua, las frutas y verduras proporcionan menos fibra que los granos que son más secos (Hoyos y Valencia, 1997), sin embargo, ciertos componentes de la

fibra, se encuentran en unos alimentos y en otros no, un alimento contiene uno o los dos tipos de fibra, aunque en general, es uno el que predomina. La celulosa se encuentra principalmente en la cubierta de los granos de cereales, en los tegumentos de las legumbres y, en menor concentración, en muchas verduras y hortalizas. Las hemicelulosas se encuentran en los mismos alimentos que la celulosa, así como en distintas frutas. Las pectinas en muchas frutas, como naranjas, limones y en general en los cítricos abunda, precisamente en la capa blanquecina existente entre la cáscara y el interior comestible. La lignina forma la parte más fibrosa del esqueleto vegetal de distintas verduras y hortalizas y también de ciertas frutas.

Actualmente al reconocerse la importancia de la fibra, se han introducido al mercado productos, sobre todo derivados del trigo, como el pan y galletas, a los cuales se les incorpora parte de la cascarilla que se les retiró durante su procesamiento y son conocidos como productos integrales (Hoyos y Valencia, 1997), también se añaden uno o más componentes de la fibra a determinados alimentos, para obtener el beneficio de su acción. Estos alimentos con fibra incorporada forman parte de los alimentos denominados funcionales (Cervera, 2004).

Respuestas Fisiológicas ante la Fibra Dietaria

La fibra dietaria no es una única sustancia o producto químico, sino un conjunto de compuestos, que agrupados y dependiendo de la proporción en que se encuentren, tienen propiedades específicas (Vázquez y Jiménez, 1999). Las propiedades físicas que poseen los componentes de la fibra dietaria, son importantes para determinar ciertas respuestas fisiológicas como degradación bacteriana, capacidad de retención de agua, absorción de moléculas orgánicas, intercambio catiónico, entre otras (Liebman, 2008).

Formación de ácidos grasos de cadena corta. La fibra dietaria no puede ser enzimáticamente degradada en el intestino delgado de los mamíferos; sin embargo, es degradada mediante fermentación anaeróbica en el intestino grueso. El grado de degradación varía considerablemente entre los polisacáridos, por ejemplo, las pectinas, gomas y mucílagos pueden ser completamente degradados, mientras que la celulosa es parcialmente hidrolizada, el grado de rompimiento puede estar relacionado con la estructura de la fibra. La fibra de frutas y vegetales es más fermentable que la de los cereales y granos (Liebman, 2008).

El grado de degradación bacteriana tiene implicaciones importantes. Los principales productos de la fermentación bacteriana son ácidos grasos volátiles de cadena corta, tal como, acético, propiónico y butírico y los gases CO₂, H₂ y algo de metano (Liebman, 2008).

Los ácidos grasos volátiles bajan el pH del colon y de esta manera pueden afectar el metabolismo bacteriano. La energía liberada de este metabolismo es usada por la bacteria para sostener su crecimiento y multiplicación, las células bacterianas contribuyen así, al aumento de volumen de las heces, aunque también da un efecto secundario que puede ser desagradable como son distensión y flatulencia (Liebman, 2008).

Capacidad de retención de agua. Las pectinas, mucílagos y en un grado limitado la hemicelulosa tienen una gran capacidad de retención de agua. La hidratación de la fibra resulta en la formación de un gel, éste puede provocar una alta viscosidad en el contenido del intestino delgado. La capacidad de retención de agua, produce cambios en el tiempo de tránsito intestinal y el vaciamiento gástrico, es el causante principal del aumento en el peso de la materia fecal (Reiser, 1987). Para utilizar esta propiedad, es imprescindible ingerir la fibra junto con cantidades elevadas de agua (Cervera, 2004).

Capacidad de absorber sustancias. La fibra es capaz de absorber ácidos biliares, colesterol y compuestos tóxicos, así como nutrientes como la glucosa. Las fibras solubles como las pectinas son capaces de disminuir los niveles de colesterol sanguíneo. Cuanto mayor es el nivel de colesterol en sangre, mayor es el efecto que producen, por eso junto con una dieta pobre en grasas son útiles para controlar el colesterol. Estudios *in vitro*, han demostrado que la lignina es un potente absorbente de ácidos biliares, la celulosa, en contraste, tiene poca capacidad de unirse a ellos (Liebman, 2008).

También las fibras solubles (pectinas, gomas) retardan el paso del alimento desde el estomago al intestino delgado, por lo que influyen en la absorción de algunos nutrientes como la glucosa y así son útiles en el tratamiento de la diabetes (Olds, 1986). Estudios realizados han propuesto que la fibra ayuda a una absorción más lenta de los azúcares y a reducir los niveles de glucosa en la sangre (Hoyos y Valencia, 1997). Estudios a corto plazo en alimentos como la avena (fibra soluble), demostraron mantener dentro del límite el nivel de azúcar en la sangre (Liebman, 2008).

Volumen de heces. El aumento de volumen de las heces produce un incremento del tamaño de la luz intestinal con la consiguiente disminución de la presión intraluminal, lo que

dificulta la posibilidad de formación de divertículos; además, al estar las heces mejor lubricadas, su paso a través del canal rectal requiere un menor esfuerzo, previniendo y mejorando la patología hemorroidal (Vázquez y Jiménez, 1999).

Motilidad colónica. La fibra dietaria es un factor fundamental en la formación de bolo fecal. El rol protector de la fibra contra la constipación está relacionado con su capacidad de inducir estimulación osmótica y mecánica de la motilidad colónica. La estimulación osmótica es causada por los ácidos grasos de cadena corta producto de la descomposición de la fibra por la fermentación por la flora colónica. La estimulación mecánica es el resultado de la capacidad de retener agua de los compuestos no digeridos, el aumento de la flora colónica, y la producción de gas durante la fermentación (Mardlaw, 2004). Su efecto fundamental es el de incrementar el bolo fecal y la frecuencia de los movimientos intestinales, regulando el tiempo de tránsito colónico (Vázquez y Jiménez, 1999).

Importancia del Consumo de Fibra Dietaria

La alimentación de las sociedades industrializadas es pobre en fibra, al consumir cereales y derivados refinados, al mismo tiempo que se ingieren pocas verduras y frutas. Esto es la causa común de las llamadas "enfermedades de la civilización" (estreñimiento, hemorroides, diverticulosis de colon, quizá cáncer de colón y otras) o, al menos, uno de sus factores de riesgo principales. Incluso existe una relación entre su baja ingesta y la enfermedad aterosclerosa (Cervera, 2004). Diversos investigadores coinciden que 30 gramos de fibra al día como mínimo, permiten cumplir con las funciones fisiológicas. En personas con problemas de estreñimiento deben ser algunos gramos mas, además la alimentación deberá de ir acompañada de cuando menos ocho vasos de agua al día, para facilitar la acción de la fibra en el organismo (Hoyos y Valencia, 1997).

Enfermedades Asociados a la Falta de Fibra Dietaria

Numerosos estudios han asociado padecimientos con un reducido consumo de fibra: estreñimiento, diverticulítis, cáncer de colon y otros trastornos del sistema gastrointestinal, arterioesclerosis, enfermedades coronarias, colesterol alto, entre otros. Las repercusiones fisiológicas de las fibras solubles e insolubles dependen de sus características fisicoquímicas (Hoyos y Valencia, 1997).

Obesidad. La obesidad ha crecido de manera acelerada en las últimas décadas, alcanzando proporciones epidémicas a partir de 1998 y, desde esa fecha, se ha convertido en uno de los principales problemas de salud pública en el mundo. La Organización Mundial de la Salud ha estimado que más de 2.8 millones de personas mueren cada año en todo el mundo a causa del sobrepeso y la obesidad (Contreras y Santiago, 2011). En el año 2008, alrededor de 35% de adultos mayores de 20 años mostraron sobrepeso, IMC \geq 25 (Índice de Masa Corporal) de los cuales 34% fueron hombres y 35% mujeres en todo el mundo. Se estimó que 205 millones de hombres y 270 millones de mujeres mayores de 20 años eran obesos. Las prevalencias de sobrepeso y obesidad fueron mayores en el Continente Americano (62% de sobrepeso en ambos sexos y 26% de obesidad), y menores en el sur de Asia (14% de sobrepeso en ambos sexos y 3% de obesidad). México ocupa el segundo lugar mundial en los índices de prevalencia de obesidad y sobrepeso, sólo debajo de los Estados Unidos de Norteamérica. Considerando el IMC, la Organización Mundial de la Salud determinó que en la actualidad 73% de las mujeres mexicanas de 15 años en adelante se encuentran en la categoría de sobrepeso con un IMC \geq 25, de las cuales 41.1% se consideran obesas. Para los hombres, las cifras son 73.6% de sobrepeso y 30.1% de obesidad (Contreras y Santiago, 2011).

La obesidad es el almacenamiento excesivo de grasa en el cuerpo; se produce por la ingestión de cantidades mayores de alimentos que el cuerpo puede consumir (Guyton y May, 2001). Evidencia epidemiológica apoya que el consumo incrementado de fibra dietaria puede jugar un papel en la prevención de la obesidad (Slavin, 2002). Varios factores pueden explicar la influencia principalmente de los cereales integrales en la regulación del peso corporal. El alto volumen, baja densidad energética y la relativa baja palatabilidad de los alimentos a base de cereal integral pueden promover la saciedad (regulación de la ingestión energética por ocasión de comida a través de los efectos de hormonas influidas por los mecanismos de masticación y

deglución). Adicionalmente los cereales integrales pueden promover la saciedad (retardar el regreso de hambre después de una comida) por varias horas después de una comida. Los cereales ricos en fibras solubles (avena y cebada) tienden a incrementar la viscosidad intraluminal, prolongando el tiempo de vaciamiento gástrico, haciendo más lenta la absorción de nutrimentos en el intestino delgado (Liu, 2007). En el año 1998 la Asociación Americana del Corazón (AHA) identificó la obesidad como el principal factor de riesgo de enfermedad cardiovascular, la obesidad tiene un efecto muy importante en el metabolismo de las lipoproteínas, el sobrepeso se asocia a un aumento de los triglicéridos, LDL y disminución del HDL (Contreras y Santiago, 2011).

Enfermedades cardiovasculares. Los factores de riesgo para las enfermedades cardiovasculares son el consumo de cigarro, edad, sexo, raza, hipercolesterolemia, inactividad física, diabetes mellitus y la obesidad (Paez, 2009). Las enfermedades cardiovasculares afectan el corazón al estrechar las arterias y reducir la cantidad de sangre que el corazón recibe, lo que hace que el corazón trabaje más intensamente. Las enfermedades cardiovasculares son la causa principal de mortalidad en todos los grupos étnicos y raciales, siendo la causa de más del 40% de las muertes al año en los Estados Unidos. Sobre la relación que se ha establecido entre el consumo de fibra y la incidencia de enfermedades coronarias, se conoce que el colesterol elevado es un factor contribuyente al desarrollo de aterosclerosis, daño vascular progresivo que puede llevar a infartos al miocardio (Hoyos y Valencia, 1997) y accidentes cerebro vasculares (embolias). Ya que la fibra propicia la reducción del colesterol sanguíneo, la disminución de colesterol sanguíneo es proporcional a la reducción de incidencia de enfermedades cardíacas (Hoyos y Valencia, 1997).

En un estudio epidemiológico de prevención con dieta mediterránea (PREDIMED) realizado recientemente en Madrid, se incluyeron 772 personas de edad avanzada y de riesgo cardiovascular elevado a las que se hizo un seguimiento de 3 meses. Se obtuvo una disminución significativa del colesterol total en los sujetos en el quintil más alto de ingesta de fibra dietaria comparado con el más bajo, y también del LDL-colesterol cuando el análisis se realizó considerando la ingesta de fibra soluble (Fernández, 2010).

Como algunas de estas fibras solubles son difíciles de incorporar a la alimentación habitual, se ha propuesto utilizarlas concentradas como alimentos funcionales. Las legumbres son otra fuente rica en fibra soluble. En un análisis de 11 ensayos clínicos aleatorizados y controlados se examinó su efecto sobre los lípidos plasmáticos, encontrándose una disminución

significativa de los valores de colesterol total, LDL y triglicéridos. El consumo de frutos secos, aunque son más ricos en fibra insoluble, también han demostrado en numerosos estudios epidemiológicos un descenso del colesterol LDL entre 2 y 19% en comparación con dietas controles y dietas bajas en grasa (Fernández, 2010).

Estreñimiento. Cuando la alimentación es baja en productos vegetales fibrosos se forman heces secas y pequeñas que no logran expandirse y hacer presión sobre el intestino para provocar el estímulo necesario para la evacuación, presentándose el estreñimiento. En estos casos, los residuos permanecen por un mayor tiempo en contacto con la mucosa del intestino grueso, causando irritación que, aunada a la falta de presión, puede llevar a la formación de pequeñas bolsas u oclusiones llamadas divertículos, en donde se acumula materia fecal, estos pueden progresar y llegar a formar tumores (Hoyos y Valencia, 1997). El efecto laxante de la fibra es causado también por los componentes fermentables en el intestino grueso, que produce ácidos grasos de cadena corta, gas y un aumento de la flora colónica. El incremento del contenido de agua y la proliferación bacteriana son dos de los mecanismos más importantes por el cual la fibra afecta el tiempo del tránsito gastrointestinal, con lo cual las deposiciones pueden ser más blandas y frecuentes (Mardlaw *et al.*, 2004).

Cáncer de colon. El cáncer de colon o del intestino grueso es una enfermedad en la cual se forman células malignas, es decir cáncer, en el revestimiento interior del colon o del recto (Douglas, 2003). Un estudio prospectivo realizado recientemente en mujeres profesionistas en EUA mostró que una dieta alta en fibra principalmente de frutas y vegetales, además de una dieta baja en carnes rojas disminuyen el riesgo de enfermedades diverticulares (Van der Kamp *et al.*, 2004). La fibra insoluble está fuertemente asociada a un bajo riesgo de enfermedad diverticular, debido a su capacidad de incrementar el tránsito intestinal, baja la posibilidad de contraer cáncer, además tiene la propiedad de ligar agentes carcinogénicos dando menos oportunidad a que los mismos se queden en el tracto digestivo (Jacobs *et al.*, 1995), el incremento de la masa fecal y la disminución en el tiempo de tránsito, le dan menos oportunidad a los mutágenos fecales para interactuar con el epitelio intestinal.

Colesterol

Definición y Estructura

El colesterol es un compuesto alicíclico cuya estructura (Figura 7) comprende el núcleo de perhidrociclopentanofenantreno con sus cuatro anillos fusionados, un solo grupo hidroxilo en la posición C3, un centro insaturado entre los átomos de carbono 5 y 6, una cadena hidrocarbonada ramificada de ocho carbonos y unida al anillo D en la posición 17 y un grupo metilo (designado C19) unido a la posición 10 y otro grupo metilo (designado C18) unido a la posición 13 (Devli, 2004).

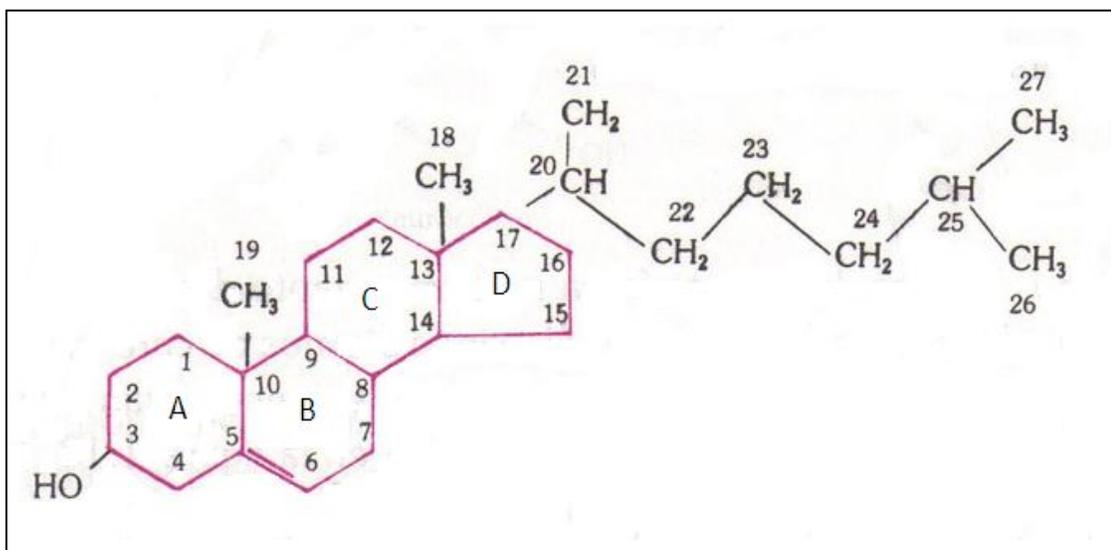


Figura 7. Estructura del colesterol (5-colesten-3 -ol).

Fuente: Devli, 2004.

El colesterol es un lípido muy poco soluble en agua a 25 °C, el límite de solubilidad es aproximadamente 0.2mg/100ml. La elevada solubilidad del colesterol en la sangre se debe a la presencia de las lipoproteínas plasmáticas (principalmente LDL y HDL), que tienen la capacidad de fijar y por tanto de solubilizar grandes cantidades de colesterol (Devli, 2004).

Fuentes del Colesterol

En contraste con otras grasas, el colesterol procede sólo de fuentes animales, siendo un producto típico del metabolismo animal, existe en los alimentos de este origen, como la yema de huevo, carne, hígado, cerebro, productos lácteos y mantequilla (Murray y Granner, 1992).

Importancia y Funciones del Colesterol

El colesterol está presente en los tejidos y en el plasma, sea como colesterol libre o combinado con un ácido graso de cadena larga como colesteril éster, la forma de almacenamiento. En el plasma ambas formas se transportan en lipoproteínas. El colesterol es un lípido anfipático y, como tal, es un componente estructural esencial de las membranas, y de la capa externa de las lipoproteínas plasmáticas (Murray *et al.*, 2010).

El colesterol es sintetizado principalmente por el hígado, y también por otros tejidos. Es necesario que los ácidos biliares secretados del hígado estén presentes en el intestino para que se absorba el colesterol, el no absorbido derivado de la dieta, y los metabolitos del esterol y ácidos biliares producidos por la flora intestinal, se excretan en las heces (Murray *et al.*, 2010).

El colesterol se encuentra en la sangre del humano (150 a 250 mg/100 ml), solo aproximadamente el 35% proviene de la dieta y el resto es sintetizado en el hígado según la ruta del ácido mevalónico, en una proporción de más de un gramo por día. El consumo excesivo de colesterol, pero principalmente de ácidos grasos saturados, incrementa el contenido del primero en la sangre, lo que a su vez puede provocar deposición de plaquetas lipídicas y el endurecimiento de las arterias (arterosclerosis), lo que ocasiona que no circule suficiente sangre y, en consecuencia, oxígeno al corazón (Badui, 2006). El colesterol está presente como integrante de las membranas celulares y es de vital importancia para el hombre en la síntesis de todos los demás esteroides del organismo, como los corticosteroides, las hormonas sexuales, así como de la vitamina D y de las sales biliares (Badui, 2006).

En su función estructural, el colesterol es un componente muy importante de las membranas celulares de los animales (no existe en los vegetales). En la membrana

citoplasmática lo hallamos en una proporción molar 1:1 con relación a los fosfolípidos, regulando sus propiedades físico-químicas, en particular la fluidez (Shin, 2005).

La vitamina D se sintetiza a partir del colesterol y más que una vitamina es una hormona, por las funciones que desempeña en el metabolismo del calcio (Garcilaso, 1995). El colesterol también es precursor de hormonas sexuales, a partir del colesterol se sintetiza la progesterona, los estrógenos y la testosterona (Garcilaso, 1995), precursor de las hormonas corticoides, como ejemplo está la síntesis del cortisol y la aldosterona (Garcilaso, 1995), precursor de las sales biliares, el hígado también excreta colesterol por la bilis y a veces forma cálculos en la vía biliar, lo que se denomina litiasis biliar (Guyton y May, 2001), por lo tanto el colesterol es imprescindible para la vida por sus numerosas funciones (Badui, 2006).

Biosíntesis del Colesterol

Junto al colesterol exógeno (procedente de la dieta) que se absorbe en el tubo digestivo, las células del organismo forman una cantidad incluso superior del colesterol exógeno (Tejón *et al.*, 2006), poco más de la mitad del colesterol del cuerpo surge por síntesis (alrededor de 700 mg/día), y el resto proviene de la dieta promedio (Murray *et al.*, 2010). La mayor parte del colesterol endógeno que circula unido a las lipoproteínas del plasma se forma en el hígado. Todas las células del cuerpo pueden sintetizar algo de colesterol, lo que estaría justificado por el hecho de ser un componente estructural de todas las membranas.

La síntesis de colesterol se realiza a partir del acetil-Coenzima A (acetil-CoA). Las células de la mucosa intestinal, glándulas suprarrenales y gónadas pueden sintetizarlo a partir del acetil-CoA, aunque fundamentalmente lo obtienen del plasma unido a las LDL (Tejón *et al.*, 2006). La acetil. CoA es la fuente de todos los átomos de carbono en el colesterol, la biosíntesis de colesterol se divide en cinco pasos: 1) Síntesis de mevalonato a partir de acetil. CoA. 2) La formación de unidades isoprenoides a partir del mevalonato por pérdida de CO₂. 3) La condensación de seis unidades de isoprenoides forma escualeno. 4) La ciclación de escualeno da lugar al esteroide madre, lanosterol. 5) Formación de colesterol a partir de lanosterol (Murray *et al.*, 2010).

Paso 1. Biosíntesis de mevalonato: la HMG-CoA (3-hidroxi-metilglutaril-CoA) se forma por las reacciones que se usan en las mitocondrias para sintetizar cuerpos cetónicos. Al principio, dos moléculas de acetil-CoA se condensan para formar acetoacetil-CoA, lo cual es catalizado por la tiolasa citosólica. La acetoacetil-CoA se condensa con otra molécula de acetil-CoA, paso catalizado por la HMG-CoA sintasa, para formar HMG-CoA, a la cual el NADPH reduce a mevalonato, reacción catalizada por la HMG-CoA reductasa. Este es el principal paso regulador en la vía de la síntesis de colesterol, y es el sitio de acción de la clase más eficaz en los fármacos que disminuyen el colesterol, las estatinas, que son inhibidores de la HMG-CoA reductasas (Figura 8) (Murray *et al.*, 2010).

Paso 2. Formación de unidades isoprenoides: el ATP fosforila de modo secuencial el mevalonato mediante tres cinasas y, luego de descarboxilación (Figura 9), se forma la unidad de isoprenoide activa, el isopentenil difosfato (Murray *et al.*, 2010).

Paso 3. Seis unidades isoprenoides forman escualeno: el isopentenil difosfato es isomerizado por medio de un desplazamiento del doble enlace para formar dimetilalil difosfato, que después se condensa con otra molécula de isopentenil difosfato para formar el intermediario de 10 carbonos geranil difosfato (Figura 9). Una condensación adicional con isopentenil difosfato forma farnesil difosfato. Dos moléculas de este último se condensan en el extremo difosfato para formar el escualeno. En un inicio se elimina el pirofosfato inorgánico, lo cual forma prescualeno difosfato, que luego se reduce mediante NADPH con eliminación de una molécula de pirofosfato inorgánico adicional (Murray *et al.*, 2010).

Paso 4. Formación de lanosterol: el escualeno puede plegarse hacia una estructura que semeja de manera estrecha el núcleo esteroide (Figura 10). Antes de que se cierre el anillo, una oxidación de función mixta en el retículo endoplasmático, la escualeno epoxidasa, convierte al escualeno en escualeno 2,3-epoxido. El grupo metilo en el C₁₄ se transfiere hacia C₁₃ y el grupo metilo en C₈ se transfiere a C₁₄ conforme sucede la ciclización, lo cual es catalizado por la oxidoescualeno: lanosterol ciclasa (Murray *et al.*, 2010).

Paso 5. Formación de colesterol: la formación de colesterol a partir de lanosterol tiene lugar en las membranas del retículo endoplasmático, e incluye cambios en el núcleo y la cadena lateral esteroides (Figura 10). Los grupos metilo en C₁₄ y C₄ se eliminan para formar 14-desmetil lanosterol y después zimosterol. El doble enlace C₅-C₆ en dos pasos, lo que forma desmosterol. Por último, el doble enlace de la cadena lateral se reduce, lo que genera colesterol (Murray *et al.*, 2010).

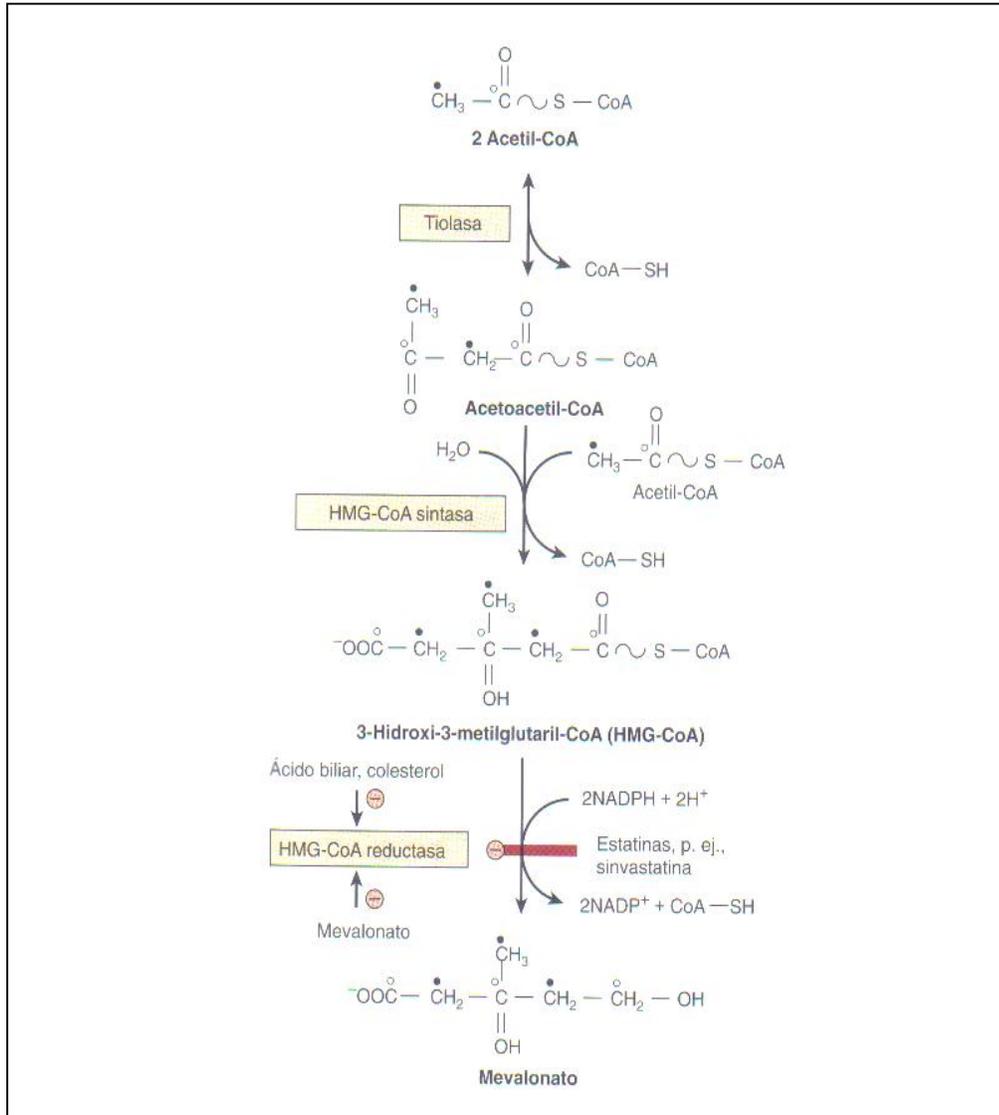


Figura 8. Biosíntesis de mevalonato. Las estatinas inhiben la HMG-CoA reductasa. Los círculos blancos y negros indican el destino de cada uno de los carbonos en la porción acetilo de la acetil-CoA.

Fuente: Murray *et al.*, 2010.

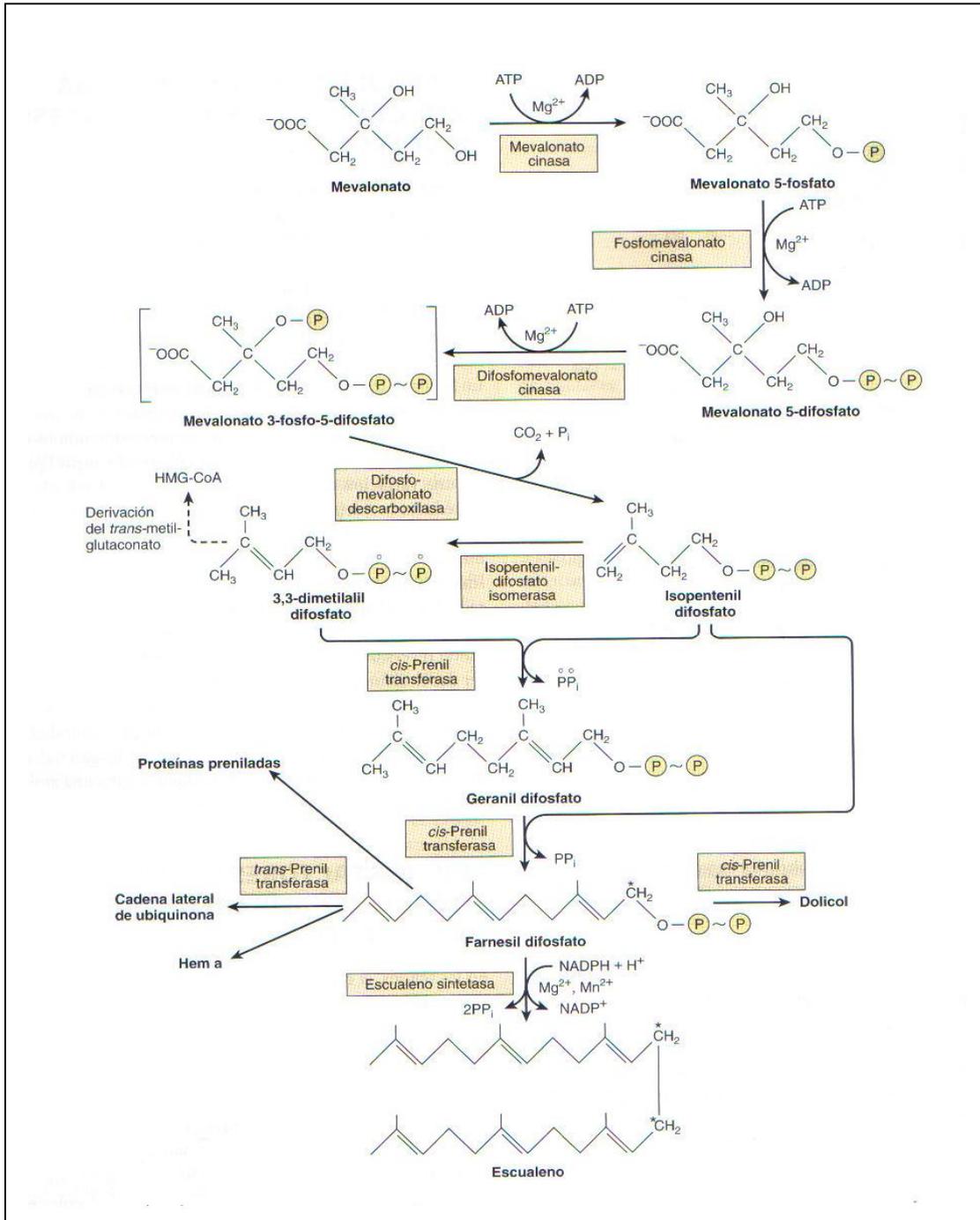


Figura 9. Biosíntesis de escualeno, ubiquinona, dolicol y otros derivados poliisopreno (HMG, 3-hidroxi-3-metilglutaril). El carbono marcado con un asterisco se convierte en C₁₁ o C₁₂ en el escualeno.

Fuente: Murray *et al.*, 2010.

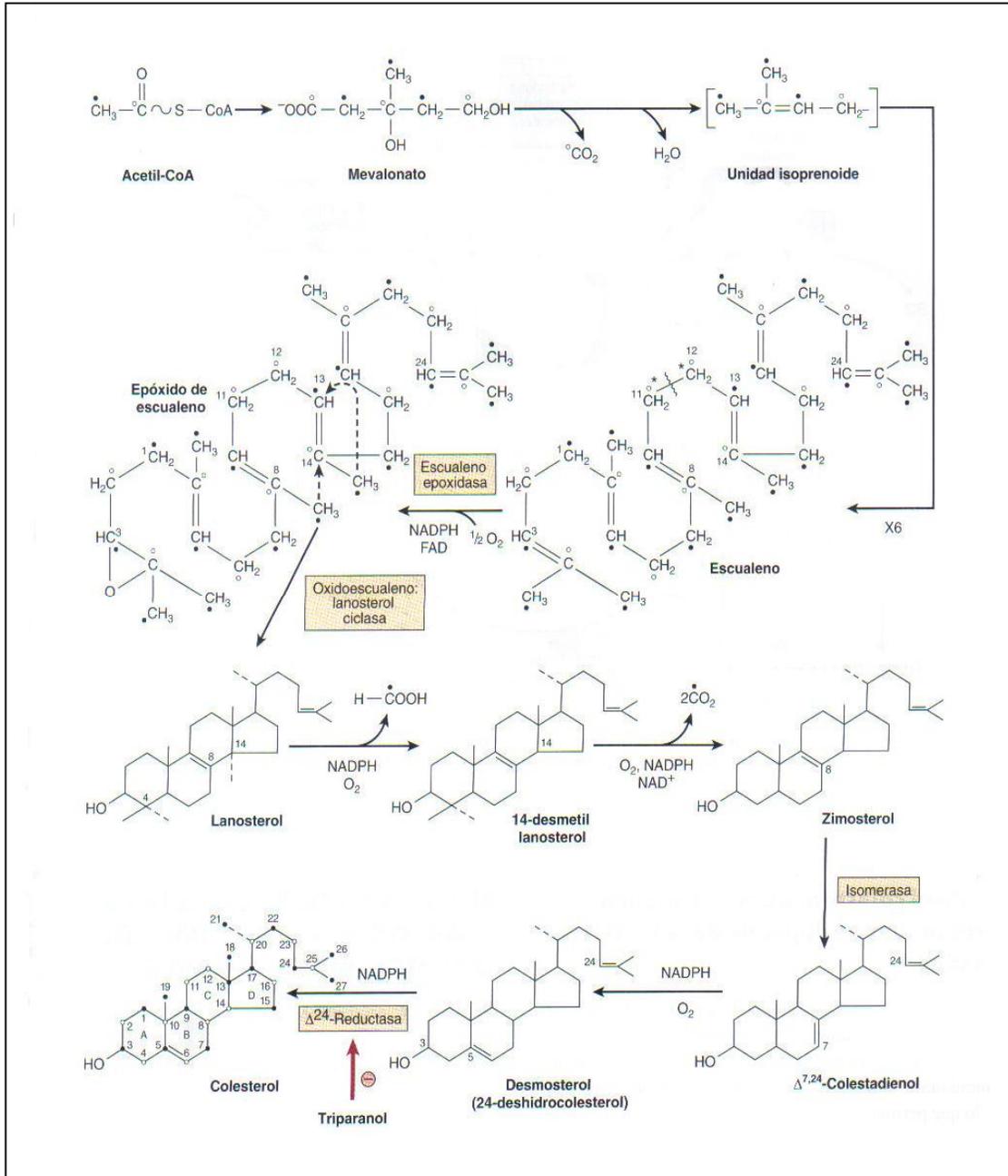


Figura 10. Biosíntesis de colesterol. Las posiciones numeradas son las del núcleo esteroide, y los círculos blancos y negros indican el destino de cada uno de los carbonos en la porción acetilo de la acetil-CoA.

Fuente: Murray *et al.*, 2010.

Transporte y Excreción de Colesterol

El colesterol junto con los triglicéridos y fosfolípidos, altamente hidrofóbicos, es transportado en los líquidos corporales unido a proteínas, en forma de agregados macromoleculares o lipoproteínas. El colesterol hepático de origen exógeno, procedente de la dieta, llega hasta el hepatocito a través de los remanentes de los quilomicrones. El colesterol endógeno, por su parte es sintetizado en la célula hepática a partir del acetyl-CoA procedente de azúcares, ácidos grasos y aminoácidos. Una parte de este colesterol endógeno sale del hígado en forma de LDL. Su incorporación está mediada por receptores específicos. El colesterol de los tejidos llega al hígado a través de las LDL, IDL y HDL. Finalmente el exceso de colesterol hepático actúa como mecanismo de autorregulación y es excretado en la bilis como tal o en forma de ácidos biliares (Tejón *et al.*, 2006).

Enfermedades Asociadas al Aumento del Colesterol

La principal participación del colesterol en procesos patológicos es como un factor en la génesis de hipercolesterolemia y aterosclerosis de arterias vitales, lo que da como resultado enfermedad cerebrovascular, coronaria y vascular periférica (Murray *et al.*, 2010).

Hipercolesterolemia. Es el nivel elevado de colesterol en el plasma sanguínea. Los aumentos patológicos de colesterol aumentan el riesgo de enfermedad cardíaca. En general, cuando el colesterol se eleva por encima de 200 mg/dl se habla de hipercolesterolemia, la posibilidad de un ataque al corazón se incrementa a medida que aumenta el colesterol total. A nivel diagnóstico, se puede considerar alta la LDL superior a 130 mg/dl, la HDL debería estar por encima de 35 mg/dl y los triglicéridos en condiciones normales deben ser inferiores a 200 mg/dl (Meri, 2005).

Aterosclerosis. Es la aparición de placas de lípidos (ateromas) que impermeabilizan las paredes de los vasos sanguíneos. Estos no pueden nutrirse de la propia sangre que transportan y se vuelven duros, además la placa tiende a crecer y taponar la luz del vaso, aumentando la presión y pudiendo llegar a cerrar el paso de la sangre. Si este vaso ocluido

estuviera en el cerebro, podría causar parálisis cerebral y si fuera una arteria coronaria, un infarto (Meri, 2005).

Fibra Dietaria y su Efecto sobre el Colesterol

Las sales biliares son formadas a partir de colesterol en el hígado y enviadas al intestino delgado para ayudar en la digestión de las grasas. Una vez cumplida su función son reabsorbidos para regresar al hígado y volver a ser utilizadas cuando se requiera. Varios estudios han demostrado que al consumir fibra, ésta reacciona en el intestino con las sales biliares, ligándolas e impidiendo su reabsorción y reutilización, por lo que el hígado para compensar la pérdida, debe retirar colesterol de la circulación y emplearlo en la formación de nuevas sales biliares (Figura 11) propiciando, con ello, la reducción del colesterol sanguíneo (Hoyos y Valencia, 1997).

En cuanto al metabolismo lipídico, parece disminuir los niveles de triacilglicéridos, colesterol de baja densidad (LDL) y reducir la insulinemia postprandial (Silveira, 2003). La capacidad fermentativa es una propiedad de la fibra (soluble) que igualmente influye en la reducción de colesterol en sangre ya que los microorganismos de la flora normal que habitan en el intestino grueso pueden fermentar la fibra en el colon formando ácidos grasos de cadena corta: acetato, propionato y butirato, este último posee una acción inhibitoria sobre la hidroximetilglutaril coenzima A reductasa, paso limitante en la síntesis de colesterol endógeno (Silveira, 2003), con esto logra interferir en las reacciones que dan origen al colesterol, provocando así una reducción en el nivel plasmático (Hoyos y Valencia, 1997).

Efecto de la Fibra Dietaria sobre la Hipercolesterolemia

Se ha demostrado que las dietas altas en fibra producen un descenso en los niveles de colesterol sanguíneo, sobre todo de las LDL sin ninguna variación de las HDL y los triglicéridos. Estos descensos se han relacionado con un aumento en la excreción fecal de colesterol y ácidos biliares. Este efecto de la fibra sobre los lípidos sanguíneos varía según el tipo de fibra

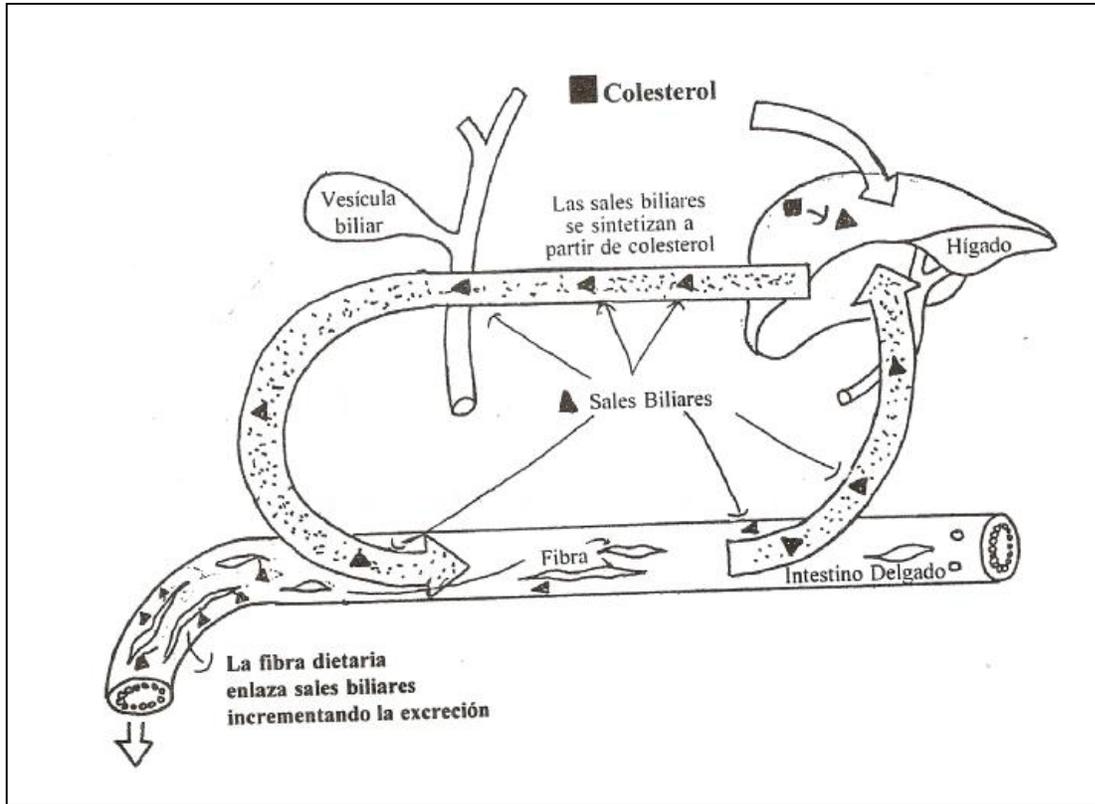


Figura 11. La fibra reduce el colesterol mediante la unión de sales biliares.

Fuente: Hoyos y Valencia, 1997.

utilizada (Chen y Anderson, 1986), así las pectinas y las fibras de las leguminosas ejercen un efecto hipocolesterolemiante, mientras que las del salvado de trigo y de maíz no producen dicho efecto (Chen y Anderson, 1986).

Son muchos los estudios que han demostrado el efecto benéfico de la fibra dietaria en lípidos plasmáticos. En un análisis de 67 ensayos clínicos controlados que incluyó 2990 sujetos con edad media de 50 años, se comprobó una reducción del colesterol total de 2 mg/dl y del colesterol-LDL de 2,6 mg/dl por cada aumento de un gramo diario de fibra ingerida. Los triglicéridos y el colesterol-HDL no sufrieron cambios significativos (Fernández, 2010).

Algunos estudios se han centrado en el efecto de una única fibra soluble sobre el perfil de lípidos. En un análisis donde se realizaron 8 ensayos clínicos para evaluar el efecto hipolipemiante del mucílago *psyllium*, se comprobó un descenso adicional del 7% de colesterol-

LDL en sujetos hipercolesterolémicos que ya hacían dieta baja en grasas (Fernández, 2010). Otros ensayos clínicos se han centrado en el efecto del β -glucano procedente de la avena y de la cebada en sujetos hipercolesterolémicos. En ellos se describe un descenso de colesterol total y LDL significativamente mayor que el observado en el grupo control (Fernández, 2010).

Lipoproteínas y su Relación con el Colesterol

Los lípidos y las proteínas se asocian de manera no covalente para formar lipoproteínas, que funcionan en el plasma sanguíneo como vehículos de transporte para los triacilgliceroles y el colesterol (Voet, 2006).

Composición y Función de las Lipoproteínas

Casi todas las lipoproteínas se forman en el hígado, lugar donde se sintetiza casi todo el colesterol, los fosfolípidos y triglicéridos del plasma. Durante la absorción intestinal de ácidos grasos, el epitelio intestinal también sintetiza pequeñas cantidades de lipoproteínas de densidad elevada (Guyton y May, 2001).

Las lipoproteínas se encuentran formadas por un núcleo esférico integrado por los componentes más apolares, triglicéridos y colesterol esterificado, envueltos por una capa de fosfolípidos y colesterol libre, de forma que las porciones más polares se orientan hacia afuera, mientras que el núcleo hidrófobo es totalmente inaccesible a las enzimas plasmáticas y será necesario que las lipoproteínas penetren en las células para que el colesterol y los triglicéridos puedan ser utilizados. Envoltiéndolo se sitúan las apoproteínas. Los lípidos y las proteínas no están envueltos covalentemente, sino que mantienen estable su estructura gracias a las interacciones hidrofóbicas entre las porciones apolares de ambos, para que de esta forma queden protegidos del contacto con el agua, pero que también les permita intercambiar sus componentes entre sí y con las membranas celulares (Tejón *et. al.*, 2006). La función básica de las lipoproteínas consiste en transportar los componentes lipídicos en la sangre (Guyton y May, 2001). Ya que los triacilgliceroles y el colesterol, son apenas solubles en solución acuosa, se

transportan por la circulación como componentes de lipoproteínas, las cuales se clasificaron en cinco categorías amplias sobre la base de sus propiedades funcionales y físicas (Voet, 2006).

Quilomicrones. Transportan triacilgliceroles y colesterol exógeno aportados en forma externa; en este caso, de la dieta desde los intestinos hasta los tejidos (Voet, 2006).

Lipoproteínas de muy baja densidad (VLDL), lipoproteínas de densidad intermedia (IDL), y lipoproteínas de baja densidad (LDL). Son un grupo de partículas relacionadas que transportan triacilgliceroles y colesterol endógenos (producidos de manera interna) desde el hígado hasta los tejidos (Figura 12) (el hígado sintetiza triacilgliceroles a partir del exceso de hidratos de carbono) (Voet, 2006).

Lipoproteínas de alta densidad (HDL). Transportan colesterol endógeno desde los tejidos hasta el hígado (Voet, 2006).

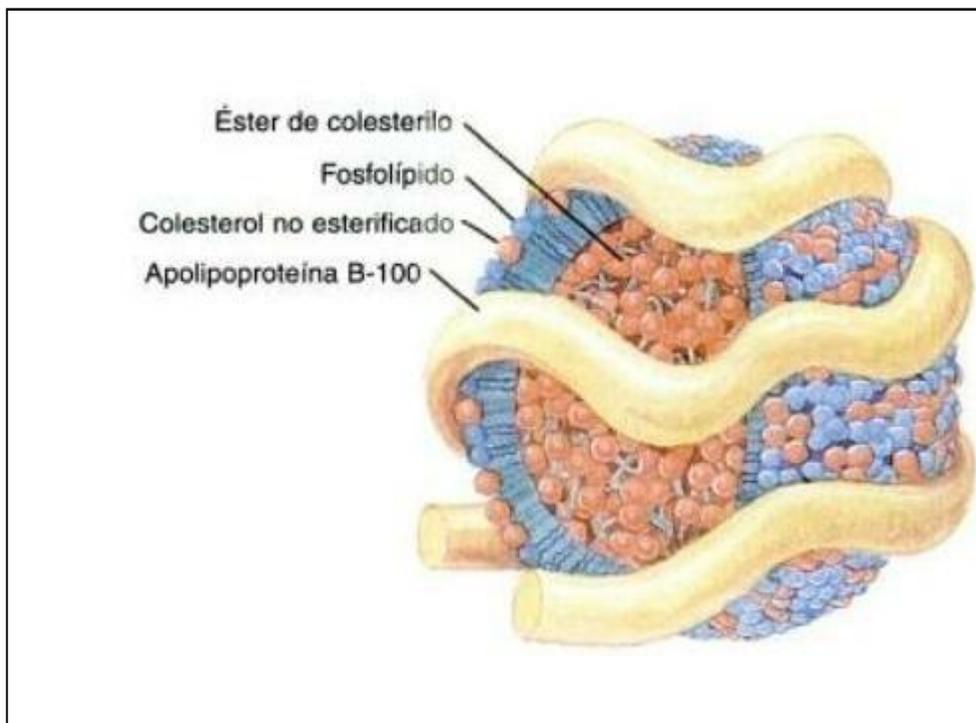


Figura 12. Esquema de la LDL, transportador principal de colesterol a través del torrente sanguíneo.

Fuente: Voet, 2006.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia Prima

Se utilizaron sorgos libres de taninos (sin testa) uno con pericarpio rojo variedad Silo max, el otro con pericarpio blanco variedad Hegari, los cuales fueron adquiridos en el comercio local. Las muestras fueron transportadas al Laboratorio de Molinos y Silos del Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos (DIPA), para su limpieza en un limpiador de granos marca Clipper y manualmente para eliminar todo tipo de impurezas.

Decortinado y Molienda

Las muestras de grano limpias se transfirieron a un decortador para remover el pericarpio del grano por pulimiento durante 3 minutos, para obtener el salvado de las dos variedades de sorgo. Para la obtención de las harinas integrales se molieron muestras de sorgo blanco y rojo en un molino de martillos marca Willey para obtener un tamaño de partícula de 80 mesh.

Análisis Químico de Salvado y Grano Entero

Se llevó a cabo el análisis químico proximal de grano entero y salvado de las dos variedades de sorgo (blanco y rojo), y para ello, se utilizaron los métodos propuestos por la AACCC (1999), siendo los siguientes, humedad (método 44-15A), cenizas (método 08-01), proteína (método 46-13), grasa (método 30-10) y fibra dietaría (método 32-05).

Se llevó a cabo el análisis de fenoles totales en base a la metodología propuesta por Kaluza *et al.* (1980) para la cual se utilizó el reactivo de Folin-Ciocalteu. La extracción se llevó a cabo pesando 0.5 g de muestra y adicionando 25 mL de metanol acidificado al 1% con HCl, el extracto permaneció en reposo y agitación por 2 h protegido de la luz, para después centrifugar

a 3500 rpm por 15 minutos a temperatura ambiente. Para la cuantificación se tomaron 100 μ L del extracto y se diluyeron con 1000 μ L de agua y se hicieron reaccionar con 100 μ L del reactivo de Folin-Ciocalteu, se agregaron 900 μ L de etanolamina 0.5M, se incubaron a temperatura ambiente por 20 minutos y la absorbancia fue leída a 765 nm. Para la cuantificación se realizó una curva estándar de ácido gálico usando concentraciones de 0 a 0.3mg/ml y expresando los resultados como equivalentes de ácido gálico por gramo de muestra.

Evaluación de Calidad Proteica

Se llevaron a cabo bioensayos para evaluar la calidad proteica de cada uno de los dos tipos de sorgos (rojo y blanco). El experimento se llevó a cabo en el laboratorio de animales de experimentación (bioterio) del DIPA.

Animales de Experimentación

Se emplearon ratas de laboratorio, tipo Sprague-Dawley de 21-23 días de edad, recién destetadas. Todas de la misma colonia y camada. Se pesaron y se separaron por sexo; se seleccionaron animales con pesos promedio de 45-65 g. De este rango se escogieron 4 animales para formar cada uno de los grupos, para cada uno de los tratamientos, donde la variación entre animales dentro de un mismo grupo, no fue mayor a 10 g.

Grupos de Experimentación

El bioensayo constó de 4 grupos con 4 animales cada uno, dos machos y dos hembras, los grupos fueron nombrados de la siguiente manera, dependiendo de su tratamiento: sorgo rojo (SR), sorgo blanco (SB), caseína (Caseína) y dieta libre de nitrógeno (DLN).

Dietas Experimentales

Para la realización de los bioensayos de calidad proteica se elaboraron dietas de acuerdo a lo propuesto por la A.O.A.C., 2005 (método 960.48). Las dietas se diseñaron en función del contenido de proteína de las materias primas, sorgo blanco y rojo, ajustando el contenido de proteína. Los ingredientes a emplear en la formulación fueron, ANRC (Animal Nutrition Research Council) caseína de referencia como fuente de proteína en la dieta control, mezcla de sales USP (United States Pharmacopeia) como fuente de minerales, mezcla de vitaminas, celulosa como fuente de fibra. Estos ingredientes fueron obtenidos de Dyets, Inc. (Bethlehem, PA.). El aceite vegetal, sacarosa y almidón, fueron obtenidos del comercio local.

En la Tabla 2 se puede observar la composición de las dietas usadas para la evaluación de calidad proteica. Las dietas de sorgo rojo, sorgo blanco y caseína fueron ajustadas a un 9% de proteína. Se utilizó también una dieta libre de nitrógeno para evaluar digestibilidad.

Tabla 2. Composición de dietas para la evaluación de calidad proteica.

Ingrediente	Dieta (g/100 g de dieta)			
	SR ¹	SB ¹	Caseína	DLN ¹
Sorgo Rojo	81.3	---	---	---
Sorgo Blanco	---	63.8	---	---
Caseína	---	---	10.11	---
Aceite	4.16	6	8	8
Celulosa	5	5	5	5
Sacarosa	5	5	5	5
Minerales	3.5	3.5	3.5	3.5
Vitaminas	1	1	1	1
Almidón	0.04	15.7	67.39	77.5

¹SR= sorgo rojo, SB= sorgo blanco, DLN= Dieta Libre de Nitrógeno.
(AOAC, 2005)

Los ingredientes fueron mezclados y homogenizados en una mezcladora automática con capacidad de 5.0 kg (Hobart Corp. Modelo A5 2001). Las dietas elaboradas fueron empacadas en lotes de 1.0 kg por dieta en doble bolsa de polietileno, se sellaron y se mantuvieron en refrigeración (4-6 °C) durante el tiempo que se realizó el bioensayo.

Periodo Experimental

Una vez formados los grupos se ordenaron las ratas de acuerdo al tratamiento experimental, colocando a los animales en forma individual en jaulas de acero inoxidable codificadas. Cada animal tuvo su propio comedero y bebedero, así como también su charola de papel colocada en la parte inferior de la jaula, para la recolección de heces, orina y alimento (con la misma codificación que la jaula). Las ratas se sometieron a una etapa de adaptación de dos días a la dieta y a las condiciones experimentales. Después de este periodo, el estudio se realizó por 14 días, los animales se mantuvieron en condiciones controladas de temperatura de 25 °C, humedad relativa de 65-80%, ciclos de iluminación de 12h luz-oscuridad donde la dieta y el agua fueron suministradas *ad-libitum*.

Se colectaron datos cada tercer día, durante los 14 días de experimento, alimento consumido, el total de heces y el incremento en peso de cada animal. Las heces recolectadas se pesaron y secaron en una estufa de convección a 50-55 °C por 12 h. Después se molieron y se les determinó el contenido de proteína usando el factor de 6.25 para la conversión de nitrógeno en proteína.

Indicadores de Calidad Proteica

La información generada se utilizó para determinar los indicadores de calidad proteica, razón neta de proteína (NPR), digestibilidad de materia seca (DMS), digestibilidad aparente de nitrógeno (DAN) y digestibilidad verdadera de nitrógeno (DVN).

Razón neta de proteína (NPR). El método de NPR se fundamenta en que existe una relación lineal para el incremento en peso del animal en función de la ingesta de nitrógeno,

desde un punto de vista de dosificación nula hasta un punto donde el incremento en peso empieza a decaer. Fue necesario el uso de animales en experimentación con dieta libre de nitrógeno para la corrección en peso debido a que no toda la proteína que se consume se destina a crecimiento, sino que parte de ella se va a mantenimiento del balance cero (Bender y Doell, 1957).

Al término del experimento se calculó la ganancia en peso que resultó de la diferencia entre el peso final y el peso inicial por rata y por grupo. De la misma manera, se determinó el consumo de proteína ($N \times 6.25$). Para el grupo con dieta libre de nitrógeno, se calculó la pérdida en peso que resulte de la diferencia entre el peso final y el peso inicial por rata y por grupo. Se calculó la Razón Neta de Proteína (NPR) para cada rata y por grupo de la siguiente manera:

$$\text{NPR} = \text{Ganancia en peso} + \text{Pérdida en peso del grupo DLN} / \text{gramos de proteína consumida}$$

Se tabuló la ganancia en peso, consumo de proteína y NPR para cada rata y por grupo de las dietas de prueba y se compararon los resultados con los obtenidos por el grupo con dieta de referencia (caseína).

Digestibilidad de materia seca (DMS). La digestibilidad de la materia seca se obtuvo de la relación del alimento total consumido menos el peso de las heces excretadas con respecto al alimento consumido. El cálculo de indicador se realizó mediante la ecuación propuesta por Church y Pond, 1974.

$$\text{DMS (\%)} = (\text{Alimento consumido} - \text{Heces excretadas}) \times 100 / \text{gramos de alimento consumido.}$$

Digestibilidad aparente de nitrógeno (DAN). Se obtuvo de la determinación de nitrógeno del alimento menos el nitrógeno de heces con respecto al nitrógeno de alimento expresado en porcentaje. La técnica asume que del total del nitrógeno de la dieta, lo que no se aprovecha por el organismo queda en las heces. Para evaluar la digestibilidad aparente fue necesario calcular el contenido de nitrógeno del alimento, el alimento consumido, el nitrógeno en heces y el peso total de las heces (Pellet, 1978). El cálculo de la digestibilidad aparente de nitrógeno se expresó de acuerdo a la ecuación:

$$\text{DAN(\%)} = \text{Nitrógeno consumido (g)} - \text{Nitrógeno en heces (g)} \times 100 / \text{nitrógeno consumido (g)}$$

Digestibilidad verdadera de nitrógeno (DVN). Este indicador considera que no todo el nitrógeno presente en heces proviene de la dieta sino que parte es proveniente de la microflora (bacterias) del tracto digestivo y enzimas usadas en las diferentes funciones metabólicas del

organismo. Se utilizó un grupo con una dieta libre de nitrógeno para el cálculo de la digestibilidad verdadera de nitrógeno (Pellet, 1978). El porcentaje de digestibilidad se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{DVN} = \frac{\text{Nitrógeno consumido grupo de prueba} - (\text{Nitrógeno fecal del grupo de prueba} - \text{nitrógeno fecal de dieta libre de nitrógeno}) \times 100}{\text{Nitrógeno consumido en grupo de prueba}}$$

Efecto de los Componentes del Salvado de Sorgo sobre el Perfil Lipídico en Ratas Hipercolesterolémicas

En esta parte del experimento se evaluó el efecto de los componentes del salvado de sorgo sobre el perfil lipídico en ratas con hipercolesterolemia inducida. La inducción se llevó a cabo durante 7 semanas, mediante la administración de una dieta alta en grasas saturadas y colesterol.

Animales de Experimentación

En la segunda parte del experimento se emplearon 44 ratas macho, tipo Wistar, provenientes de la misma colonia. Se seleccionaron animales con un peso de 200 g. Los sujetos de experimentación fueron obtenidos del bioterio del DIPA.

Inducción de Hipercolesterolemia

Para inducir hipercolesterolemia, los sujetos de experimentación se dividieron en dos grupos, con inducción y sin inducción, con 22 animales cada uno. Al grupo inducción se le administró una dieta alta en grasas saturadas y colesterol, al grupo sin inducción se le administró una dieta basal con aceite vegetal y sin agregar colesterol (Tabla 3), por un periodo de 49 días (7 semanas) de acuerdo a lo propuesto por Auger *et al.* 2005.

Tabla 3. Composición de las dietas experimentales para inducción de hipercolesterolemia.

Ingrediente	Porcentaje (%)	
	Con Inducción	Sin Inducción
Almidón	38.6	46.6
Caseína	20	20
Sucrosa	15.4	15.4
Manteca	15	---
Aceite	---	8
Celulosa	5	5
Minerales	3.5	3.5
Vitaminas	1	1
Colesterol	1	---
DL- metionina	0.3	0.3
Bitartrato de colina	0.2	0.2

(Auger *et al.*, 2005)

Los ingredientes fueron mezclados y homogenizados en una mezcladora automática con capacidad de 5.0 kg (Hobart Corp. Modelo A5 2001). Las dietas elaboradas fueron empacadas en lotes de 3.0 kg por dieta en doble bolsa de polietileno. Se sellaron y se mantuvieron en refrigeración (4-6 °C) durante el tiempo que se realizó el bioensayo. Las condiciones experimentales fueron las mismas del experimento anterior.

Grupos de Experimentación

Para evaluar el efecto de los componentes del salvado de sorgo rojo y blanco sobre el perfil lipídico, se dividieron los dos grupos, con inducción y sin inducción, en cuatro subgrupos, para administrar los tratamientos de prueba, dieta de salvado de sorgo rojo y salvado de sorgo blanco, y los tratamientos controles, dieta basal con celulosa y dieta con salvado de trigo.

Dietas Experimentales

En la Tabla 4 se puede observar la composición de las dietas de prueba utilizadas para evaluar el efecto de los componentes del salvado de las dos variedades de sorgo sobre la hipercolesterolemia, los valores de fibra fueron ajustados al 5%. Se emplearon como control dietas con salvado de trigo y celulosa al mismo nivel de adición de fibra dietaria que las dietas de salvado de sorgo.

Los ingredientes fueron mezclados y homogenizados en una mezcladora automática con capacidad de 1.0 kg. Las dietas elaboradas fueron empacadas en lotes de 1.0 kg por dieta en doble bolsa de polietileno, se sellaron y se mantuvieron en refrigeración (4-6 °C) durante el tiempo que se realizó el bioensayo.

Análisis del Perfil Lipídico en Suero (Colesterol Total, HDL, LDL y Triglicéridos)

Durante el período de inducción se realizaron análisis semanales a partir de la cuarta semana de experimentación. Después del periodo de inducción, se realizaron dos análisis durante las cuatro semanas de duración de las dietas de prueba. El primer y segundo análisis fueron realizados a la segunda y cuarta semana, respectivamente.

Los animales fueron anestesiados usando una cámara saturada con éter etílico, con un ayuno de 12 horas, para la extracción de sangre por punción cardiaca, se obtuvieron de 3 a 4 ml de sangre y se colocaron en tubos de ensaye sin anticoagulante debidamente etiquetados, y posteriormente se realizó la separación del suero del paquete globular mediante centrifugación (3,000 rpm durante 10 minutos).

Se cuantificó el contenido de colesterol total utilizando el método multienzimático colorimétrico CHOD PAD colesterol liquicolor, el HDL colesterol con patrón de marca RANDOX por el método de precipitación con ácido fosfotúngstico, los triglicéridos utilizando la prueba triglicéridos liquicolor GPO-PAP, estos métodos son de marca STANBIO y el LDL fue calculado a partir de $VLDL = \text{triglicéridos}/5$ y $LDL = \text{colesterol total} - (VLDL + HDL)$.

Tabla 4. Composición de dietas para los tratamientos sin inducción y con inducción de hipercolesterolemia.

Ingrediente	Dietas Sin Inducción (%)				Dietas Con Inducción (%)			
	Celulosa	Sorgo Rojo	Sorgo Blanco	Trigo	Celulosa	Sorgo Rojo	Sorgo Blanco	Trigo
Caseína	20	17.16	18.27	18.01	20	17.6	18.27	18.01
Celulosa	5	---	---	---	5	---	---	---
Salvado de sorgo rojo	---	23.71	---	---	---	23.71	---	---
Salvado de sorgo blanco	---	---	15.92	---	---	---	15.92	---
Salvado de trigo	---	---	---	10.84	---	---	---	10.84
Sucrosa	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4
Almidón	46.6	31.7	37.4	42.73	39.1	23.21	29.9	35.23
Manteca vegetal	---	---	---	---	15	15	15	15
Aceite vegetal	8	8	8	8	---	---	---	---
Minerales	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Vitaminas	1	1	1	1	1	1	1	1
Colesterol	---	---	---	---	0.5	0.5	0.5	0.5
DL- metionina	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Bitartrato de Colina	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Análisis Clínicos e Investigación de la Universidad de Sonora (LACIUS) y en un laboratorio particular.

Índice Aterogénico

El cociente o índice aterogénico es la proporción matemática entre los niveles de colesterol total en el organismo y colesterol HDL o lipoproteínas de alta densidad. Valores normales de este índice son menores de 4, a mayor índice aterogénico mayores son las probabilidades de que se forme una placa de ateroma en las arterias y de origen a aterosclerosis. El índice aterogénico se calculó mediante la siguiente ecuación (Vijaya *et al.*, 2009):

$$\text{Índice aterogénico} = \frac{\text{Valores de Colesterol Total (mg/dL)}}{\text{Valores de HDL (mg/dL)}}$$

Diseño Experimental y Análisis Estadístico

Para la primera parte del experimento, referente a los estudios de calidad proteica se utilizó un diseño experimental unifactorial totalmente aleatorizado, donde el único factor fue el tipo de sorgo a estudiar (rojo y blanco). El diseño empleado en la parte experimental de inducción de hipercolesterolemia fue de dos factores, uno por tipo de dieta (salvado de sorgo blanco, salvado de sorgo rojo, salvado de trigo y dieta basal celulosa) y el otro de inducción de hipercolesterolemia (con y sin inducción). En ambos experimentos, las variables respuesta fueron cada una de las determinaciones a realizar.

A los datos obtenidos de acuerdo a cada diseño se les realizó un análisis de varianza y la comparación de medias de los tratamientos se llevó a cabo con la prueba de Tukey a un nivel de significancia del 5%. El análisis estadístico se realizó utilizando el paquete computacional SAS, Inc. Versión 8.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis Químico Proximal

El análisis químico proximal fue realizado con la finalidad de conocer la composición nutrimental de las materias primas utilizadas, grano entero y salvado de las dos variedades de sorgo (blanco y rojo), así como del salvado de trigo, usado como control. Las determinaciones de humedad, cenizas, proteína, grasa y fibra dietaria se realizaron siguiendo la metodología oficial propuesta por la AACCC (1999).

En la Tabla 5 se observan los resultados obtenidos del análisis proximal realizado al grano entero y salvado de sorgo blanco y rojo, así como al de salvado de trigo.

Humedad

Los valores de humedad obtenidos para el grano entero de sorgo rojo y blanco fueron de 8.48% y 10.02%, mostrando diferencias significativas entre sí. El valor reportado por la USDA (2012) es de 9.20% para sorgo blanco, lo que sugiere que los porcentajes obtenidos se encuentran dentro del rango y que las diferencias entre los valores pueden deberse a las condiciones de almacenamiento y/o manejo de las muestras. En los salvados se obtuvieron porcentajes de 8.07% para sorgo rojo, 9.97% para sorgo blanco y 8.76% para trigo.

Proteína

El segundo componente mayoritario del grano de sorgo es la proteína. Tanto factores genéticos como de medio ambiente afectan el contenido de proteína. En este cereal la

Tabla 5. Composición química de grano entero y salvado de sorgo rojo (SR), sorgo blanco (SB) y trigo (T).

Análisis	Grano Entero		Salvados		
	SR	SB	SR	SB	T
Humedad	8.48 b ± 0.07	10.02 a ± 0.13	8.07 c ± 0.09	9.97 a ± 0.03	8.76 b ± 0.02
Proteína ¹	11.53 b ± 0.00	14.37 a ± 0.30	11.70 b ± 0.23	10.83 b ± 0.48	18.02 a ± 0.11
Cenizas ¹	1.77 b ± 0.03	1.91 a ± 0.04	2.92 b ± 0.08	2.57 c ± 0.04	4.02 a ± 0.01
Grasa ¹	6.05 a ± 1.69	3.20 a ± 0.64	4.67 a ± 1.00	6.11 a ± 0.08	3.70 a ± 0.84
Carbohidratos ²	73.92	72.31	74.21	72.45	67.79

¹Valores reportados en base seca

²Carbohidratos determinados por diferencia

³ Dentro de una misma fila y para cada tipo de muestra (grano entero y salvado), valores con distinta letra son significativamente diferentes p<0.05.

variabilidad es amplia, probablemente porque el cultivo se desarrolla bajo diversas condiciones agroclimáticas las cuales afectan la composición del grano (FAO, 1995; Burleson *et al.*, 1956; Waggle *et al.*, 1967; Deosthale *et al.*, 1972). Dentro de la estructura anatómica del grano de sorgo, la proteína se encuentra localizada en el endospermo con un 80% del valor del grano entero y en el germen con 15%, aunque también en la fracción de salvado se encuentra una pequeña cantidad de este nutrimento (4.3%) (FAO, 1995).

De acuerdo al análisis realizado, los valores obtenidos para el grano entero de sorgo rojo y blanco fueron de 11.53% y 14.37%, respectivamente, siendo significativamente diferentes. Mnembuka y Eggum (1993) reportan valores de 11.81% en sorgo rojo y 12.00% en sorgo blanco. El valor reportado por la USDA (2012) es de 11.30% y 12.3% según la FAO (1995). El resultado para el salvado de sorgo rojo fue de 11.70%, salvado de sorgo blanco 10.83% y salvado de trigo 18.02%, siendo estas tres muestras estadísticamente diferentes, sin embargo, no hay diferencias significativas en el contenido proteico entre los salvados de sorgo de ambas variedades. Para la fracción de salvado de sorgo, sin especificar variedad, la FAO (1995) ha reportado un contenido proteico de 6.7%, mientras que para el salvado de trigo se ha encontrado un valor de 14.70% (Sotelo *et al.*, 2002).

Cenizas

La composición mineral del grano de sorgo es altamente variable. Más que factores genéticos, las condiciones medioambientales predominantes en la región donde la planta se desarrolla afecta el contenido de minerales de este cereal (FAO, 1995). En este grano, la materia mineral está distribuida de manera desigual y se encuentra mayormente concentrada en el germen y en la cubierta seminal (FAO, 1995; Hubbard *et al.*, 1950).

Los porcentajes de cenizas obtenidos para los granos de sorgo de ambas variedades presentaron diferencias significativas. El contenido de minerales en sorgo rojo fue de 1.77% y en sorgo blanco fue de 1.91%, mientras el reportado por la FAO (1995) es de 1.67%, valor muy similar a los obtenidos para ambas variedades. Respecto a los salvados, el porcentaje de cenizas fue de 2.68% en SR y 2.37% en SB, siendo cercanos al valor reportado por la FAO (1995) que es de 2.0%. De manera general, los salvados presentaron mayor contenido de cenizas que los granos enteros, esto se atribuye hecho de que la fracción de salvado incluye la

cubierta seminal, parte estructural del grano entero que contiene una alta concentración en compuestos minerales. Asimismo, el salvado de trigo obtuvo 4.02% de cenizas y Sotelo *et al.* (2002) reportan un 5.46%.

Grasa

El contenido de grasa cruda en el sorgo es del 3%, el cual es más alto que en el del trigo y arroz pero más bajo que en el maíz. El germen y las capas de aleurona son los principales contribuyentes de la fracción de lípidos. El germen por sí mismo aporta cerca del 80% de contenido lipídico total (FAO, 1995; Rooney y Serna-Saldívar, 1991).

Los resultados obtenidos para el grano entero de sorgo rojo y blanco fueron 6.05% y 3.20%, respectivamente, no presentando diferencias significativas entre sí, mientras que lo reportado por la USDA (2012) es de 3.30%. Estas variaciones pueden encontrar explicación debido a que el contenido lipídico está principalmente localizado en el germen y se conoce que en algunos mutantes de sorgo con una amplia fracción embrionaria el contenido de grasa es más alto (5.8 a 6.6 por ciento) que el normal (FAO, 1995; Jambunathan, 1980). Además, las variaciones en el contenido de grasa en el grano pueden atribuirse, en parte, a los diferentes sistemas de extracción con solvente utilizados en dicha determinación (FAO, 1995). Para los salvados de sorgo rojo y blanco los valores fueron de 4.67% y 6.11% respectivamente, acercándose éstos al contenido de 4.9% de grasa reportado por la FAO (1995). El salvado de trigo obtuvo 3.37% y Sotelo *et al.* (2002) reportan un valor de 2.27%. Las tres muestras de salvado no presentan diferencias significativas entre sí.

Determinación de Fibra Dietaria en Salvados de Sorgo Rojo, Sorgo Blanco y Trigo

En todas las semillas hay dos fuentes de fibra dietaria, el pericarpio y la pared celular de los componentes estructurales que la conforman (FAO, 1995). El proceso de decorticación implica la separación completa de endospermo de la fracción de salvado, es decir, de todo el pericarpio. Entre más limpia sea esta separación se asegura que el salvado tenga la concentración máxima de los componentes deseables que se encuentran en éste (Awika *et al.*,

2005). La fracción de salvado de sorgo contiene altos niveles de fitoquímicos (Awika *et al.*, 2005) y es rica en fibra dietaria (Rooney *et al.*, 1992).

En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos de fibra dietaria total (FDT) y sus fracciones, soluble (FDS) e insoluble (FDI) para los salvados de SR y SB obtenidos por 3 minutos de decorticación y para el salvado de trigo comercial. Como se observa, en todas las muestras la fracción de FDS se encuentra en menor cantidad, siendo dichos valores muy similares entre ellos, mientras que la fracción de FDI es mayor. El valor de FDT para cada salvado en orden ascendente es 24.36% en SR, 28.5% en SB y 48.12% en T, presentando diferencias significativas entre ellos. No se encontraron estudios que reporten valores de FDT en salvados de sorgo de las variedades utilizadas. Awika *et al.* (2005) reportaron valores de FDT en salvados obtenidos por 2 minutos de decorticación de 40.3% para sorgo marrón sin testa (variedad SC103), 38.3% para sorgo blanco y 47.6% para trigo. La discrepancia entre los resultados reportados y los obtenidos en el presente estudio pueden deberse a las variedades de sorgo utilizadas en ambos.

Tabla 6. Fibra dietaria soluble, insoluble y total de salvados de sorgo rojo, sorgo blanco y trigo.

Análisis	Sorgo Rojo (%)	Sorgo Blanco (%)	Trigo (%)
Fibra Dietaria Soluble ¹	1.67 a	1.61 a	2.68 a
Fibra Dietaria Insoluble ¹	22.69 c	26.89 b	45.44 a
Fibra Dietaria Total ¹	24.36 c	28.50 b	48.12 a

¹ Dentro de una misma fila valores con distinta letra son significativamente diferentes $p < 0.05$.

Determinación de Fenoles Totales en Salvados de Sorgo Rojo, Sorgo Blanco y Trigo

En los últimos años los compuestos antioxidantes han llamado especialmente la atención debido a su potencial de suministrar efectos protectores hacia enfermedades crónicas y degenerativas, como cáncer y enfermedades cardiovasculares. Éstos tienen la capacidad de limpiar los radicales libres del cuerpo humano y de este modo detener o disminuir el grado de daño de los radicales libres en las moléculas biológicas como lípidos, proteínas y ADN (Wu *et al.*, 2004). Los antioxidantes se encuentran en alimentos comúnmente consumidos, particularmente en frutas y vegetales. Los antioxidantes más familiares son las vitaminas A, C y E, pero recientemente se ha reconocido la habilidad de otros compuestos no nutrientes como los fenoles por su capacidad de funcionar como antioxidantes (Hagerman *et al.*, 1998).

Algunos granos de sorgo contienen altos niveles de antioxidantes que pueden ser concentrados mediante la molienda. La decorticación ha sido utilizada para producir salvados con actividades antioxidantes en base seca que rebasan a las de los arándanos azules, fresas y vino tinto (Awika, 2003). Por ello, el salvado de sorgo es un ingrediente nutracéutico prometedor por ser rico en fitoquímicos y fibra (Cedillo-Sebastian, 2005). Se ha reportado que algunos sorgos contienen altos niveles de fitoquímicos como proantocianidinas (Awika *et al.*, 2003; Hahn y Rooney, 1986), 3-deoxiantocianinas (Gous, 1989; Awika *et al.*, 2004; Awika *et al.*, 2004), ácidos fenólicos (Waniska *et al.*, 1989), fitoesteroles (Singh *et al.*, 2003) y policosanoles (Huang *et al.*, 2004) en sus fracciones de salvado (Awika *et al.*, 2005).

Se realizó la determinación de fenoles totales para cada tipo de salvado. Los salvados de sorgo fueron obtenidos por decorticación durante 3 minutos. Los resultados se muestran en la Figura 13.

Como se puede observar, la concentración de fenoles totales difiere para cada muestra de salvado, habiendo diferencias significativas entre sí y siendo más altos los valores obtenidos en los salvados de sorgo rojo y sorgo blanco. En orden descendente la concentración de compuestos fenólicos se presenta así: 9.29 mg EAG/g en SR, 3.56 mg EAG/g en SB y 1.40 mg EAG/g en T.

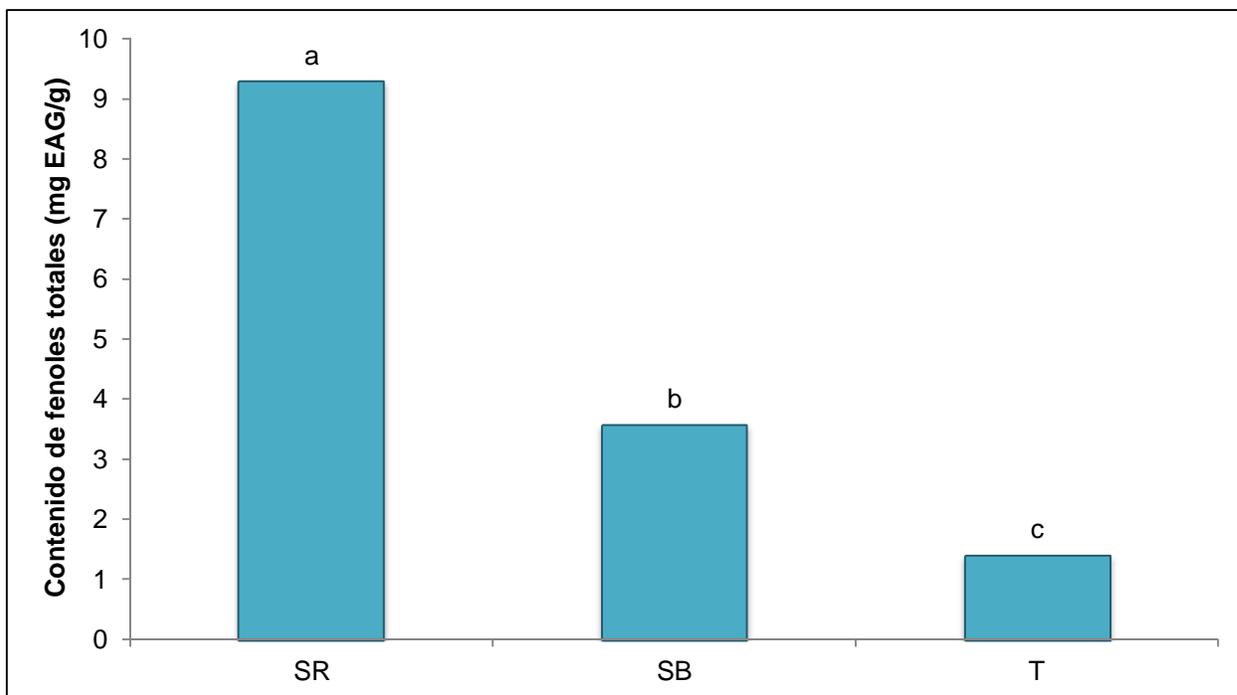


Figura 13. Contenido de fenoles totales en salvados de sorgo rojo (SR), sorgo blanco (SB) y trigo (T).

Estos resultados se asemejan a los reportados por Awika *et al.* (2005), quienes encontraron una concentración de fenoles totales en grano entero de sorgo marrón (variedad SC103 con testa) y blanco de 13.5 mg EAG/g y 0.8 mg EAG/g, respectivamente. En el mismo estudio indican que los salvados de dichos sorgos muestran una concentración de fenoles totales de 2 a 3 veces mayor que en grano entero, utilizando el mismo tiempo de decorticación que en el presente trabajo (≈ 27.3 mg EAG/g en salvado de sorgo marrón y ≈ 2.40 mg EAG/g en salvado de sorgo blanco). Las diferencias entre el presente estudio y el reportado pueden deberse a diferencias en las variedades de sorgo utilizadas. Sin embargo, se cumple el mismo patrón en ambos; en variedades de sorgo con color (ya sea marrón o rojo) se observa una concentración superior de fenoles totales que en sorgo blanco.

El incremento de fenoles totales para el SR es atribuido a la presencia de flavonoides del tipo antocianinas, principalmente la 3-deoxiantocianidinas las cuales son responsables del color negro, púrpura, y rojo del grano (Awika *et al.*, 2004). Además, la variación genética, diferentes condiciones agronómicas y ambientales durante el desarrollo del grano influyen en el contenido de fenoles (Serna-Saldívar, 1996).

Evaluación de Calidad Proteica por Bioensayos

Una de las cualidades en los alimentos son sus atributos nutricionales, los cuales pueden evaluarse mediante diferentes tipos de técnicas, entre las que se encuentran los análisis biológicos, que son considerados indicadores importantes en este campo (Bender, 1994). En el presente estudio se evaluaron las harinas integrales de sorgo rojo y blanco mediante un análisis biológico, utilizando las siguientes pruebas: Digestibilidad de Materia Seca (DMS), Digestibilidad Aparente de Nitrógeno (DAN), Digestibilidad Verdadera de Nitrógeno (DVN) y Razón Neta de Proteína (NPR). Para llevar a cabo cada evaluación se diseñaron dietas de prueba para las harinas integrales de sorgo rojo (SR) y blanco (SB), ajustando el contenido de proteína al 9%, máximo valor al que se pudo ajustar considerando la proteína que aporta el SR (11.53%). También se formuló una dieta estándar de caseína (CAS) para el nivel de proteína evaluado, y además se usó una dieta libre de nitrógeno (DLN).

Ganancia en Peso y Razón Neta de Proteína

La razón de crecimiento de un organismo está generalmente relacionada a la velocidad de síntesis de proteína la cual, a su vez, es dependiente de la abundancia de ribosomas y otros componentes celulares asociados con la biosíntesis de proteínas (Ghose y Ghosh, 2003). Esto también depende de la proteína que se consume proveniente de la dieta. La función primaria de la proteína dietaria es satisfacer las necesidades nitrógeno y aminoácidos esenciales en el organismo. Se conoce que la calidad de una proteína depende principalmente de su composición en aminoácidos esenciales, así como de su fácil digestibilidad (FAO, 1995).

Para evaluar la calidad de proteína, Block y Mitchell (1946) introdujeron el concepto de índice de aminoácidos, en el cual la cantidad del aminoácido esencial que se encuentra en mayor déficit se expresa como un porcentaje de la cantidad presente en una proteína estándar o de referencia, como lo son, por su alto valor biológico, las proteínas del huevo y de la leche materna. El índice de aminoácidos para el grano de sorgo es de 37, siendo la lisina el aminoácido más limitante (FAO, 1995). Se ha observado que existe una amplia variabilidad en la composición de aminoácidos esenciales en la proteína del grano de sorgo (FAO, 1995; Hulse *et al.*, 1980; Jambunathan *et al.*, 1984). Naik (1968), observó grandes variaciones en el patrón

de distribución de las fracciones proteicas en las variedades de sorgo. En general, las albúminas oscilan del 2 al 9 por ciento de la proteína total, mientras que las globulinas van del 12.9% al 16%, las prolaminas de 27% a 43% y las glutelinas de 26.1% a 39.6%. Estudios en la composición de aminoácidos de las fracciones proteicas (Ahuja *et al.*, 1970) mostraron que las fracciones de albúmina y globulina contenían altas cantidades de lisina y triptófano y en general estaban bien balanceadas en su composición de aminoácidos esenciales. Por otro lado, la fracción de prolamina se encontró extremadamente pobre en lisina, arginina, histidina y triptófano y con un alto contenido de prolina, ácido glutámico y leucina (FAO, 1995).

Gassem y Osman (2003), en su estudio con variedades de grano entero de sorgo rojo (Hamra) y blanco (Baidha), encontraron que la composición de aminoácidos es similar en ambas variedades. El análisis de aminoácidos hecho reveló que las proteínas de ambos sorgos son ricas en ácido glutámico (21.9 mg/16g N en sorgo rojo y 17.45 mg/16g N en sorgo blanco), leucina (13.65 mg/16g N en sorgo rojo y 10.5 mg/16g N en sorgo blanco) y alanina (9.15 mg/16g N en sorgo rojo y 6.85 mg/16g N en sorgo blanco), pero deficiente en lisina (180 mg/16g N en sorgo rojo y 1.30 mg/16g N en sorgo blanco), como ocurre en otros cereales. La baja cantidad de aminoácidos con grupo sulfuro (metionina, 0.75 mg/16g N y 0.60 mg/16g N, respectivamente) es debido a la destrucción de metionina y cisteína durante el proceso de hidrólisis. Éstos resultados coinciden con los valores reportados con Rooney y Serna-Saldívar (1982) y Mnembuka y Eggum (1993). Neucere y Sumrell (1979) indicaron que el bajo contenido de lisina en sorgo es atribuido al alto contenido de prolaminas en la mayoría de las variedades comunes de este cereal. De acuerdo al perfil de aminoácidos en las proteínas de ambos sorgos y comparando estos valores con los patrones de puntuación dados por FAO/WHO (1981), esto es, la cantidad de aminoácidos esenciales presentes por gramo de proteína (mg/g de proteína), Gassem y Osman (2003) indicaron que las cantidades de isoleucina, treonina, valina y metionina son más bajas que los valores patrón reportados por FAO/WHO (1981). Asimismo, la lisina es el primer aminoácido limitante y se encuentra en cantidades muy pequeñas en este cereal.

Los resultados de NPR y aumento en peso se presentan gráficamente en la Figura 14. Ambas determinaciones presentan un comportamiento similar. Por un lado, el aumento en peso fue mayor en la dieta control de caseína (48.9 g), seguido de la dieta de SR (11.37 g) y SB (8.55 g). Estadísticamente las dietas de prueba son iguales. Asimismo, en NPR, la dieta control de caseína obtuvo el valor más alto (3.84), seguido de la dieta de SR (2.27) y, con un valor menor, la dieta de SB (1.99). Aunque ya se han realizado evaluaciones nutricionales de este cereal, los parámetros evaluados son distintos a los evaluados en la presente investigación por lo que no

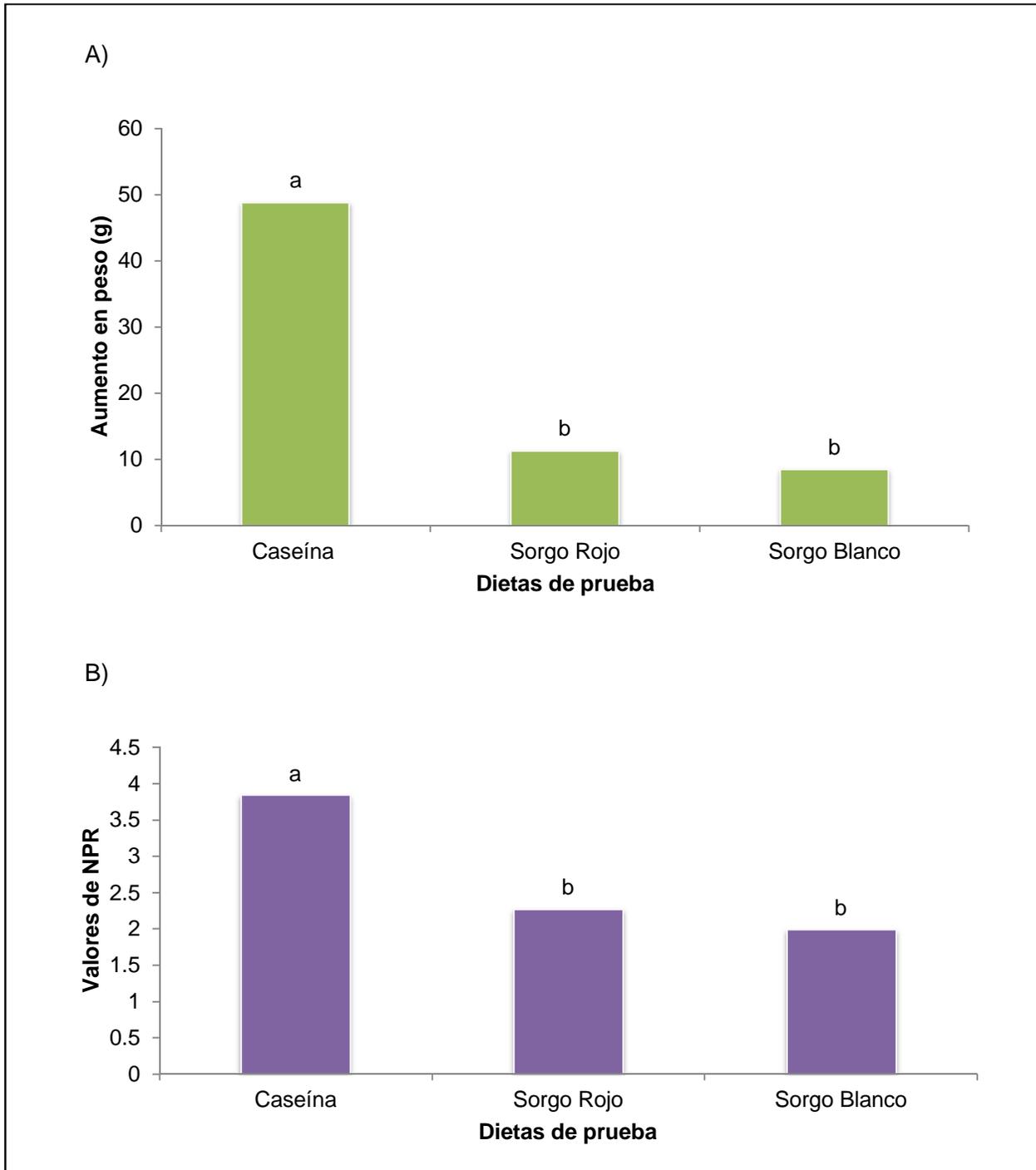


Figura 14. Indicadores de calidad proteica en las distintas dietas de prueba durante el bioensayo. A) Aumento en peso. B) Valores de Razón Neta de Proteína (NPR).

se encontró información para comparar los datos obtenidos. No obstante, el comportamiento observado tanto en ganancia en peso como en NPR puede deberse en gran parte a que el sorgo rojo presenta un, ligero, pero mayor contenido de aminoácidos esenciales que el sorgo blanco.

Son escasos los estudios de valor nutricional en sorgo utilizando la técnica de razón neta de proteína (NPR). Sin embargo, este cereal está cobrando cada vez más importancia en su estudio por su amplia utilización como alimento de consumo humano y principal fuente de energía y proteína para millones de personas en extrema pobreza en África y Asia (Klopfenstein y Hosney, 1995), como alimento para consumo animal en Estados Unidos y México (U.S. Grains Council, 2006) y como materia prima para la producción de alcohol y otros productos industriales (Shawrang *et al.*, 2010). Se cree que el presente estudio marcará una pauta para la realización de investigaciones posteriores respecto a este cereal, lo cual en un futuro cercano se reflejará en una mayor, mejor y más segura utilización del mismo como alimento para consumo humano.

La Tabla 7 muestra los resultados obtenidos de las pruebas biológicas de digestibilidad de materia seca (DMS) y aparente (DAN) y verdadera de nitrógeno (DVN) realizadas para cada dieta de prueba.

Tabla 7. Valores de digestibilidad de materia seca (DMS), digestibilidad aparente de nitrógeno y digestibilidad verdadera de nitrógeno (DVN) en grano entero de sorgo rojo y sorgo blanco.

Dieta	DMS ¹ (%)	DAN ¹ (%)	DVN ¹ (%)
Caseína	93.59 a ± 0.41	88.69 a ± 5.43	91.36 a ± 5.74
Sorgo Rojo	90.24 b ± 0.52	73.41 b ± 1.23	77.83 b ± 1.45
Sorgo Blanco	93.59 a ± 0.58	84.44 a ± 1.96	88.93 a ± 1.43

¹ Dentro de una misma columna valores con distinta letra son significativamente diferentes $p < 0.05$. Los valores son el promedio de 4 ± la desviación estándar de 4 repeticiones.

Digestibilidad de Materia Seca

La materia seca es un indicador de la capacidad nutricional de los alimentos, la cual nos proporciona información acerca de la absorción de todos los nutrientes presentes en el producto y su posible asimilación (Bender, 1994).

Como se observa en la Tabla 7, las dietas de prueba presentaron porcentajes de DMS muy similares entre sí. Caseína y SB son estadísticamente iguales. La dieta de SR obtuvo un valor de digestibilidad significativamente menor que la de SB y control de caseína. Numerosos factores contribuyen al problema de la baja digestibilidad que presentan algunos tipos de sorgos. Aspectos exógenos como la interacción de las proteínas con componentes no proteicos, tales como los polifenoles, almidón, polisacáridos no almidonosos, fitatos y lípidos. Así como factores endógenos tales como la naturaleza de las proteínas en sí mismas y su organización dentro del grano (Wong *et al.*, 2009; Belton *et al.*, 2006; Duodu *et al.*, 2003; Ezeogu *et al.*, 2005, 2008; Hamaker y Bugusu, 2003).

Gassem y Osman (2003) en su estudio realizado con sorgo rojo (Hamra) y blanco (Baidha) encontraron que la actividad inhibidora de tripsina era igual en ambos sorgos, mientras que la actividad inhibidora de amilasa era mayor en sorgo rojo que en sorgo blanco. Por otro lado, la concentración de ácido fítico fue mayor en sorgo rojo que en sorgo blanco, pero ambos menores que los presentes en el mijo (Abdalla *et al.*, 1998), maíz blanco y arroz (Marfo *et al.*, 1990).

Aunque no se trate exactamente de las mismas variedades, lo anterior puede explicar el comportamiento observado respecto a los porcentajes de DMS obtenidos en las dietas de prueba. Sin embargo, los valores de DMS presentados en las dietas de prueba no son bajos en comparación con el valor de la dieta control de caseína.

Digestibilidad Aparente y Verdadera de Nitrógeno

Una de las determinaciones biológicas más importantes en la calidad de los alimentos es la digestibilidad de nitrógeno, esta determinación es un indicador que revela una de las

características de calidad nutricional de los productos desde el punto de vista de absorción de nutrientes (Bender, 1994).

La clasificación nutricional de las proteínas se basa en la proporción que presentan de todos los aminoácidos esenciales y también en su digestibilidad (Hernández y Sastre, 1999). La digestibilidad de la proteína corresponde a la porción del nitrógeno ingerido que se absorbe (Velázquez, 2006). Es esencialmente una medida de la susceptibilidad de una proteína a la proteólisis. Una proteína con alta digestibilidad tiene potencialmente un mejor valor nutricional que una de baja digestibilidad debido a que la primera puede proveer más aminoácidos para la absorción en la proteólisis (Duodu *et al.*, 2003). Se sabe que no toda la proteína dietaria se digiere en el mismo grado. Existen diferencias en la digestibilidad debido a diferencias intrínsecas en las proteínas de los alimentos, incluyendo la forma en la cual las cadenas de aminoácidos están arregladas. Las moléculas de proteína fuertemente enrolladas o de estructura globular son más difíciles de digerir que aquellas que tienen una estructura más abierta, ya que las enzimas digestivas pueden atacar más fácilmente. Los aminoácidos pueden estar unidos por ciertos enlaces químicos, haciéndolos de esta manera menos disponibles (Hegarty, 1995).

En la Tabla 7 se presentan los valores de digestibilidad aparente (DAN) y digestibilidad verdadera de nitrógeno (DVN) obtenidos para las dos dietas de prueba. De manera general, se observa que los resultados se asemejan entre sí, sin embargo, las digestibilidades (DAN y DVN) en SB fueron significativamente mayores respecto a SR. Los resultados obtenidos en DAN y DVN en las dietas de prueba fueron, 84.44 y 88.93% en SB, y 73.41% y 77.83% en SR. Estudios realizados por Mnembuka y Eggum (1993) a variedades de sorgo (*Sorghum vulgare*) blanco (Lionje) y rojo (Serena) muestran porcentajes de digestibilidad verdadera más altos en sorgo blanco (92.6%) que en sorgo rojo (69.8%). Los resultados del estudio citado son semejantes a los obtenidos en el presente trabajo, ya que ambos siguen una misma tendencia, es decir, mayor digestibilidad en sorgo blanco que en sorgo rojo. Se observa un mayor porcentaje de DVN obtenido por Mnembuka y Eggum (1993) en sorgo blanco. Esto puede ser atribuido al manejo y preparación de la muestra, ya que, en el trabajo citado después de la obtención de las harinas de sorgo blanco y rojo, ambas se sometieron a un tratamiento térmico (hervir por 45 min.), lo que pudo resultar en la eliminación de algunos antinutrientes presentes en el grano como taninos y ácido fítico, así como en la desnaturalización de algunas proteínas por la alta temperatura, exponiendo más las cadenas de los aminoácidos para el fácil acceso y rápido ataque de las enzimas proteolíticas digestivas, dando como resultado una mejor digestibilidad.

Los resultados obtenidos también pueden ser debido a diversos factores que afectan la digestibilidad de la proteína del grano de sorgo, los cuales pueden dividirse en dos grandes categorías: por un lado los factores exógenos, que se refieren a factores que surgen de la interacción de las proteínas del sorgo con componentes no proteicos como polifenoles (taninos, flavonoides y ácidos fenólicos), los cuales pueden formar complejos con las proteínas que son indigeribles, ocurriendo esto principalmente en variedades de sorgos altos en taninos (Chibber *et al.*, 1980). Los polisacáridos no almidonosos (principalmente fibra dietaria y otros componentes de la pared celular del pericarpio o endospermo), también forman asociaciones con las proteínas (Glennie, 1984; Bach Knudsen y Munck, 1985) dando como resultado la formación de compuestos indigeribles debido a que la accesibilidad de las enzimas proteolíticas a éstos se ve limitada. Se ha encontrado que el almidón y ácido fítico, en forma de fitatos se encuentran principalmente en el germen (Hulse *et al.*, 1980; Ali y Harland, 1991) y el pericarpio (García-Esteva *et al.*, 1999), formando complejos insolubles de fitato. proteína que son menos susceptibles al ataque de las enzimas digestivas (Knuckles *et al.*, 1985). Otro aspecto a considerar en la digestibilidad de proteína es la estructura organizacional dentro del grano, es decir, grano entero, endospermo y cuerpos proteicos (Duodu *et al.*, 2003). Por otro lado, existen factores endógenos que afectan la digestibilidad de proteína, estos surgen de cambios entre las proteínas del sorgo en sí mismas y no involucran interacción de proteínas con componentes no proteicos. Entre éstos se pueden mencionar el entrecruzamiento de proteínas, el cual incluye entrecruzamiento de isopéptidos y disulfuros (Duodu *et al.*, 2003).

Efecto de los Componentes del Salvado de Sorgo Sobre el Perfil Lipídico de Ratas con Hipercolesterolemia Inducida

Las enfermedades cardiovasculares (ECV) son la tercera causa de muerte en el mundo (WHO, 2006), y la presencia de elevados niveles de colesterol en sangre es uno de los principales factores de riesgo (Kannel *et al.*, 1971). El control de colesterol total y LDL a través de la dieta y productos farmacológicos disminuyen el riesgo de eventos coronarios (Sacks *et al.*, 1996; Byington *et al.*, 1995; Kushi *et al.*, 1985; Burr *et al.*, 1989), sin embargo, el método de intervención más importante es la dieta (NCEP, 1993).

Datos epidemiológicos indican que el consumo de granos enteros reduce significativamente la mortalidad causada por ECV (Kushi *et al.*, 1999; Slavin *et al.*, 2000; Anderson, 2003). Se cree que los fitoesteroles presentes en el salvado de los cereales

producen efectos benéficos a la salud. Otros componentes presentes en los granos enteros, tales como los polifenoles y la fibra, también juegan un papel importante en la prevención de las ECV (Awika y Rooney, 2004).

En el grano de sorgo, muchos de los fitoquímicos están concentrados en las fracciones de salvado. Esta fracción contiene altos niveles de fitoquímicos que incluyen proantocianidinas (Awika *et al.*, 2003; Hahn y Rooney, 1986), 3-deoxiantocianinas (Gous *et al.*, 1989; Awika *et al.*, 2004), ácidos fenólicos (Waniska *et al.*, 1989), fitoesteroles (Singh *et al.*, 2003) y policosanoles (Huang *et al.*, 2004); además, esta fracción es rica en fibra dietaria (Rooney *et al.*, 1992). El salvado puede ser fácilmente separado del grano de sorgo por decorticación, y después ser usado para extraer los diferentes fitoquímicos presentes, ya sea para suplementación dietaria, mejoramiento de la calidad de los alimentos o aplicaciones terapéuticas (Awika y Rooney, 2004).

A pesar de los altos niveles y la diversidad de fitoquímicos en el sorgo, la investigación sobre este cultivo como fuente de compuestos importantes para el mejoramiento de la salud está rezagada detrás de otros productos básicos como son frutas y verduras. Como resultado, la utilización de las fracciones del sorgo en alimentos para promover una mejor nutrición es muy limitada. El sorgo tiene un gran potencial, dadas sus propiedades agronómicas, así como la reciente evidencia que hay en los efectos fisiológicos de los fitoquímicos presentes en el grano (Awika y Rooney, 2004).

Los estudios *in vivo* acerca del efecto del sorgo sobre las ECV son escasos (Awika y Rooney, 2004). Es por ello que en el presente trabajo y mediante la realización de un bioensayo se investigó el efecto de los componentes del salvado de sorgo producido en la región del sur de Sonora (variedades Silo Max y Hegari) sobre la hipercolesterolemia, padecimiento que aqueja a nuestro país y que es uno de los principales factores de riesgo para las ECV.

La Tabla 8 muestra de manera general los resultados obtenidos de cada parámetro analizado por tratamiento, en los cuales se observa que para cada uno hubo diferencias significativas respecto a los tratamientos de inducción (CI) y sin inducción (SI). El comportamiento observado coincidió con lo que se esperaba obtener en los parámetros de colesterol total (CT), LDL-colesterol (LDL), índice aterogénico (IA) y HDL-colesterol (HDL), es decir, valores mayores de CT, LDL e IA, y menores en HDL en el tratamiento de inducción respecto al de sin inducción

Tabla 8. Valores promedio de los distintos parámetros analizados durante el período de prueba.

Parámetro	Tratamiento	
	Inducción	Sin Inducción
Colesterol Total ^{1,2}	159.10 a	94.02 b
HDL-Colesterol ^{1,2}	50.60 b	76.51 a
LDL-Colesterol ^{1,2}	98.81 a	3.43 b
Triglicéridos ^{1,2}	48.40 b	70.36 a
Índice Aterogénico ^{1,2}	3.63 a	0.57 b

¹ Dentro de una misma fila, valores con distinta letra son significativamente diferentes $p < 0.05$.

² Expresados en mg/dL.

La Tabla 9 muestra de manera global los resultados obtenidos de cada parámetro analizado por tratamiento para cada dieta. Se observan diferencias significativas entre los tratamientos con inducción y sin inducción en todos los parámetros evaluados. Los tratamientos con inducción presentan mayor contenido de colesterol total, LDL e índice aterogénico que los tratamientos sin inducción. Se puede decir, por lo tanto, que se logró la inducción de hipercolesterolemia en ratas por efecto de la dieta.

Colesterol Total

El colesterol es un lípido sencillo que se presenta en el organismo de forma libre y esterificada. Forma parte de las membranas celulares y es un importante precursor de los ácidos y sales biliares que ayudan a digerir los alimentos en los intestinos, así como de las hormonas esteroideas, estrógeno y testosterona (Díaz *et al.*, 1997). Sin colesterol ninguna de estas funciones tendría lugar y, sin ellas, los seres humanos no existirían. Sin embargo, un exceso de colesterol puede ser mortal (Freeman y Junge, 2005). El colesterol plasmático proviene en parte de su síntesis endógena en el hígado y en otros órganos; y por otro lado, del procedente de la ingesta de alimentos (Díaz *et al.*, 1997) que lo contienen naturalmente o los que son ricos en

Tabla 9. Valores promedio de los distintos parámetros observados en las dietas experimentales.

Parámetro	Tratamiento							
	Inducción				Sin Inducción			
	Basal	SB	SR	Trigo	Basal	SB	SR	Trigo
Colesterol total ^{1,2}	184.9 a	138.0 b	163.6 ab	149.9 ab	106.6 a	98.4 ab	89.6 b	85.5 b
Triglicéridos ^{1,2}	41.9 a	45.8 a	58.9 a	47.0 a	47.8 b	117.6 a	42.1 b	66.2 ab
HDL-colesterol ^{1,2}	60.3 a	47.9 a	49.8 a	4.1 a	74.8 ab	90.6 a	66.7 b	73.3 ab
LDL-colesterol ^{1,2}	116.1 a	80.8 a	101.9 a	96.3 a	22.2 a	0.7 b	14.5 a	0.9 ab
Índice								
Aterogénico ¹	3.6 a	3.3 a	3.8 a	3.81 a	0.85 a	0.44 b	0.6 b	0.48 b

¹ Dentro de una misma fila para cada tratamiento, valores con distinta letra son significativamente diferentes $p < 0.05$.

² Expresados en mg/dL.

grasas saturadas, las cuales hacen que el hígado produzca cantidades excesivas del mismo. Existe una relación directa entre los niveles de colesterol total en suero y el riesgo de ECV. No obstante, es preciso reconocer que el colesterol del suero no es homogéneo.

Debido a su naturaleza hidrofóbica, el colesterol sólo puede mantenerse solubilizado en la sangre mediante su unión a lipoproteínas, siendo las principales y distinguiéndose por su densidad: LDL (lipoproteínas de baja densidad) y HDL (lipoproteínas de alta densidad) (Fuster *et al.*, 1997). El colesterol total en sangre es la suma del colesterol transportado mediante dichas partículas (THI, 2011). Cuando se habla de los niveles de colesterol, lo importante no es el nivel total, sino el desglose del mismo. Cada uno de estos dos tipos de partículas tiene efectos absolutamente opuestos sobre los vasos sanguíneos y sobre la probabilidad de que éstos se bloqueen. En pocas palabras, HDL protege al cuerpo de las ECV, mientras que LDL puede provocarlas, ya que éste último tiende a asentarse en los lugares más inadecuados, como las paredes arteriales (Freeman y Junge, 2005). Los problemas asociados al colesterol se producen cuando se encuentra en concentraciones superiores a las normales (Masana, 2009). Las partículas de LDL viajan por el torrente sanguíneo llevando el colesterol a todas las partes del cuerpo que lo necesitan, del hígado al músculo, a las arterias, los pulmones y el corazón. Cuando en este ir y venir la cantidad que circula por el torrente sanguíneo es superior a la necesaria aparecen los problemas. El colesterol LDL excesivo se deposita en la pared de los conductos sanguíneos, las arterias, provocando la formación de una capa de grasa que crece conforme transcurre el tiempo hasta obstruirlas por completo, impidiendo el flujo de sangre (Masana, 2009), lo que puede conducir a infartos de miocardio y a accidentes cerebrovasculares (Freeman y Junge, 2005). La hipercolesterolemia es uno de los principales factores de riesgo cardiovascular (Aranceta *et al.*, 2007). Varios experimentos clínicos controlados han demostrado que la reducción de los niveles de colesterol disminuye el riesgo de ECV (LRCP, 1984a, b; Frick *et al.*, 1987; Fuster *et al.*, 1997).

De manera general y de acuerdo a los resultados arrojados por el análisis estadístico (Tabla 8), se observa que hubo diferencias significativas en la concentración de colesterol total (CT) entre los tratamientos de inducción (CI) y sin inducción (SI), siendo mayor en CI (159.10 mg/dL) y menor en SI (94.02 mg/dL).

En la Figura 15 se expresa el comportamiento del CT por tratamiento y dieta de prueba durante el periodo de experimentación. En general, se observa que ambos tratamientos

siguieron la misma tendencia, es decir, presentaron una disminución en la concentración de CT en sangre respecto al día cero y treinta de experimentación, excepto la dieta basal del tratamiento sin inducción, en la cual se mantuvo la concentración inicial durante todo el experimento.

La Figura 15 (A) muestra el comportamiento de CT para el tratamiento CI, observándose de manera global que las dietas con mejor respuesta en la disminución de CT en sangre respecto al valor inducido de 167 mg/dL y en orden ascendente fueron sorgo blanco (102.5 mg/dL), basal (111.75 mg/dL), trigo (126.75 mg/dL) y sorgo rojo (146.75 mg/dL), correspondiendo estos valores a los obtenidos al término del bioensayo. De acuerdo al análisis estadístico realizado y como se observa en la tabla 9, las dietas experimentales en este tratamiento no presentaron diferencias significativas entre sí, excepto la dieta basal con respecto a SB, siendo SB significativamente menor.

La Figura 15 (B) muestra el comportamiento de CT para el tratamiento SI, donde se puede observar que hubo una disminución en la concentración de CT en sangre respecto al valor inicial de 107 mg/dL en las distintas dietas experimentales, siendo los valores finales 76.3 mg/dL en SR, 79.66 mg/dL en T y 80.5 mg/dL en SB, mientras que la dieta basal mantuvo la concentración inicial del mismo (106.75 mg/dL). Estadísticamente no hubo diferencia entre las dietas de SB, SR y T, pero sí con respecto a la dieta basal, la cual fue significativamente mayor (Tabla 9) lo que indica que las fibras de sorgo y trigo tuvieron mejor efecto fisiológico.

Al final del experimento el SB en los tratamientos de inducción logró una mayor disminución (aunque no significativa) de colesterol total, esto aunque estadísticamente no es relevante, desde el punto de vista de control del paciente sí representa un beneficio.

De acuerdo a los resultados obtenidos y debido a que en todas las dietas se observó una disminución del CT con el tiempo de experimentación, la fibra presente en las dietas es la que más contribuye a la disminución de este parámetro.

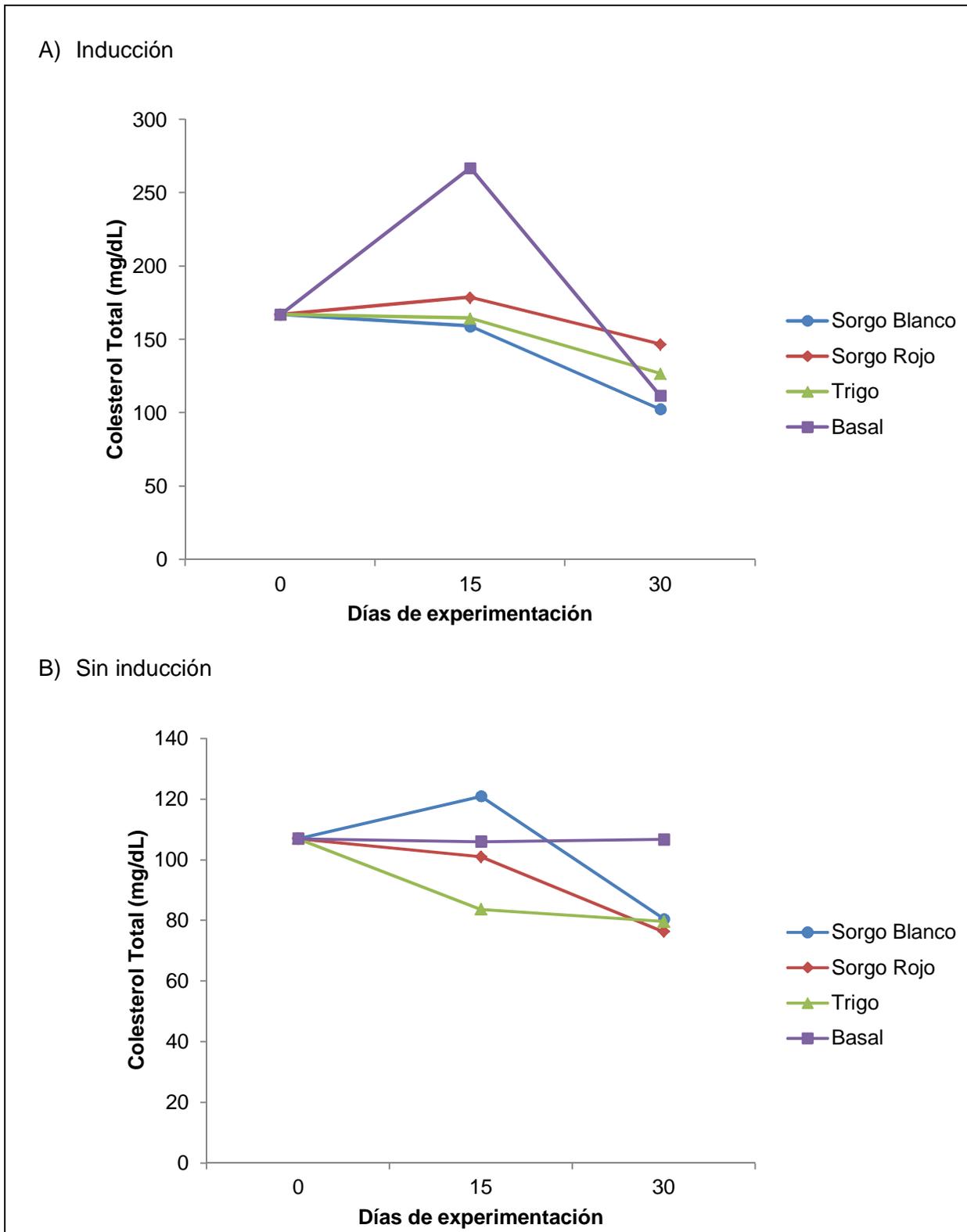


Figura 15. Comportamiento de colesterol total con respecto al tiempo en las diferentes dietas experimentales para los tratamientos con inducción (A) y sin inducción (B).

La influencia de los diferentes componentes de la dieta sobre los niveles de colesterol es importante y constituye uno de los principales métodos de prevención de las ECV (Aranceta *et al.*, 2007). La cantidad de LDL en el torrente sanguíneo está relacionada con la cantidad de grasas saturadas y de colesterol que se ingieren, así que la mayoría de las personas pueden reducir su nivel de LDL si siguen una dieta baja en grasas (Freeman y Junge, 2005). Kushi *et al.* (1999), Slavin *et al.* (2000) y Anderson (2003) recomiendan el consumo de granos enteros, ya que la fibra, los polifenoles y otros fitoquímicos presentes en ellos juegan un papel importante en la reducción del colesterol y, por lo tanto, en la prevención de las ECV (Awika y Rooney, 2004).

Triglicéridos

De manera general y de acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis estadístico (Tabla 8), se observó que hubo diferencia significativa entre los tratamientos de inducción y sin inducción, siendo mayor en SI (70.36 mg/dL) y menor en CI (48.40 mg/dL).

La Figura 16 (A) muestra el comportamiento de los triglicéridos con respecto al tiempo en las diferentes dietas experimentales en el tratamiento CI. De manera general se observa que las dietas de SR, T y basal presentaron la misma tendencia, es decir, disminuyeron los niveles de TG en sangre. El valor de TG en el día cero fue de 42 mg/dL. Los valores de TG en el día treinta en orden ascendente fueron: basal (28.5 mg/dL), T (37 mg/dL), SB (43.5 mg/dL) y SR (46.5 mg/dL). Los niveles más altos de TG se presentaron en la dieta SR y los niveles más bajos en la dieta basal. En la tabla 9 se puede observar que estadísticamente las diferentes dietas de prueba del tratamiento de CI son iguales, es decir, no hubo diferencia significativa entre ellas.

En la Tabla 9 se puede observar los valores promedio de las distintas dietas de prueba para el tratamiento SI. Las dietas de SB y T fueron significativamente mayores que las dietas SR y basal.

La Figura 16 (B) muestra el comportamiento de los TG con respecto al tiempo en las diferentes dietas experimentales en el tratamiento de SI. De manera general se puede observar

que las dietas de SR, T y basal presentaron la misma tendencia hacia el final del experimento, es decir, disminuyeron los niveles de TG en sangre. El valor de TG al inicio del experimento, día cero, fue de 54.5 mg/dL. Los valores de TG en el día treinta en orden ascendente fueron: SR (40 mg/dL), basal (44.55 mg/dL), T (47.33 mg/dL) y SB (155.8 mg/dL). Las dietas SR, T y basal presentaron comportamiento diferente en el día 15, la dieta SB presentó un aumento considerable en el nivel de TG hacia el final del experimento.

LDL-Colesterol

De manera general y de acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis estadístico (Tabla 8), se observó que hubo diferencia significativa entre los tratamientos de inducción y sin inducción, siendo significativamente mayor en CI (98.81 mg/dL) y menor en SI (3.43 mg/dL).

La Figura 17 muestra el comportamiento del LDL-Colesterol con respecto al tiempo en las diferentes dietas experimentales en el tratamiento CI. De manera general se observa que las dietas de prueba presentaron la misma tendencia, es decir se observa una considerable disminución de LDL en sangre con respecto al día cero en todos los casos.

El valor inicial de LDL el día cero fue de 144.7 mg/dL. Los valores que se observan en la Figura 17 al día treinta en orden ascendente fueron: Basal (42.3 mg/dL), SB (44.8 mg/dL), T (68.6 mg/dL) y SR (82.7 mg/dL), siendo la dieta basal la que presentó menor valor de LDL. Los valores más altos de LDL se presentaron en las dietas de T y SR. Los valores más bajos de LDL se presentaron en las dietas basal y SB, sin embargo, se puede observar que el valor más alto de LDL se presentó en la dieta basal alrededor del día quince de experimentación, disminuyendo posteriormente.

En la Tabla 9 se puede observar que no se presentaron diferencias estadísticas significativas entre las dietas de prueba, sin embargo comparando los promedios de cada dieta se tiene que en las dietas de SB (80.86 mg/dL), SR (101.94 mg/dL) y T (96.32 mg/dL) se presentó una disminución considerable del LDL comparado a la dieta basal (116.14 mg/dL), dieta que presentó el promedio más alto de LDL. El comportamiento del parámetro LDL para las dietas en el tratamiento SI fue similar (datos no mostrados).

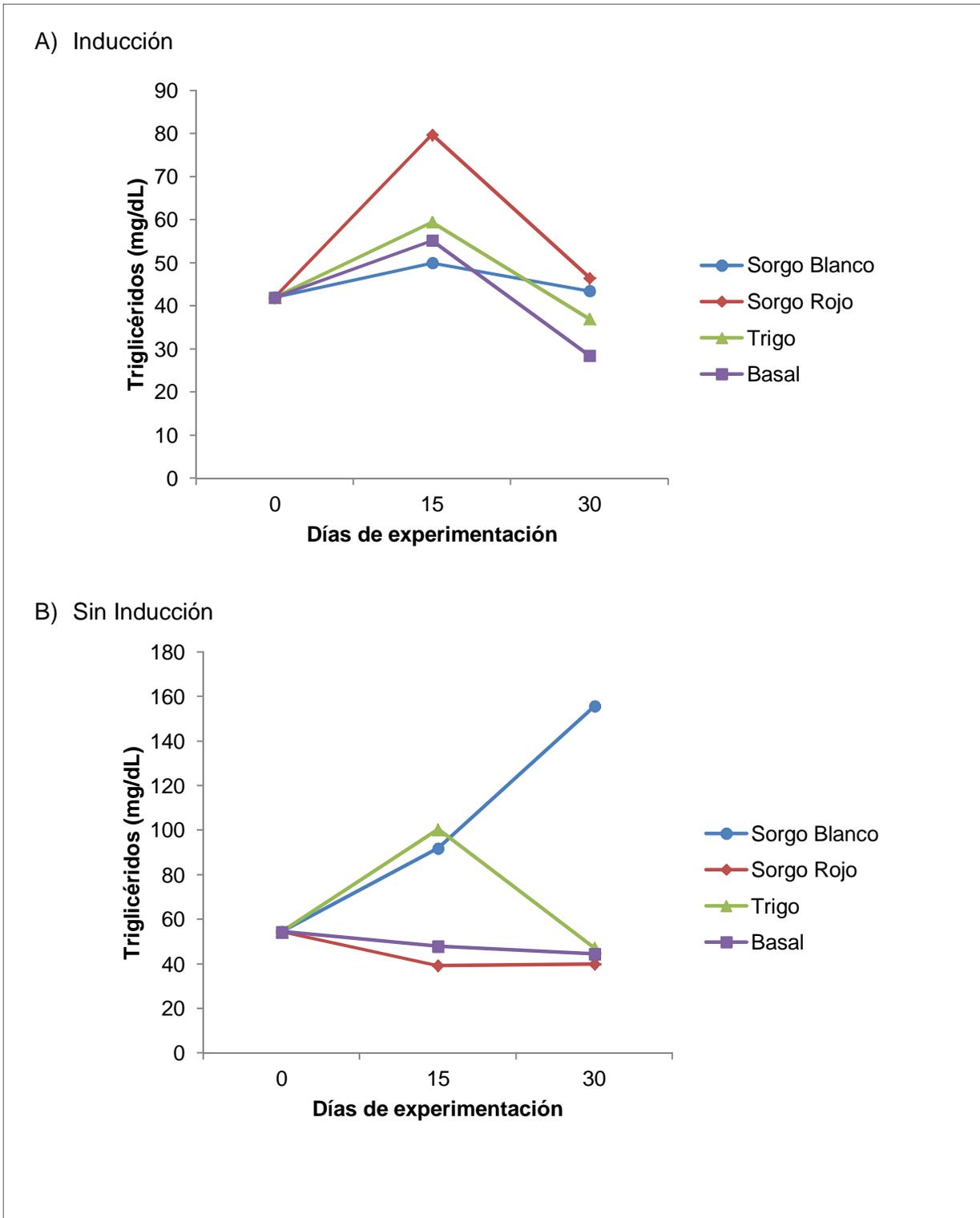


Figura 16. Comportamiento de los triglicéridos con respecto al tiempo en las diferentes dietas experimentales para los tratamientos con inducción (A) y sin inducción (B)

En 1988, el National Cholesterol Education Program identificó el colesterol de lipoproteínas de baja densidad (LDL) elevado como el factor de riesgo más importante para padecer enfermedad coronaria (Torres, 2002), por lo tanto, existe una relación proporcional entre el riesgo de enfermedad coronaria y las concentraciones en sangre de LDL (Dvorkin *et al.*, 2010), de forma que mayores reducciones del colesterol-LDL producen mayores reducciones en el riesgo, por lo tanto las diferencias de LDL obtenidas en las dietas experimentales representan una diferencia significativa en términos médicos.

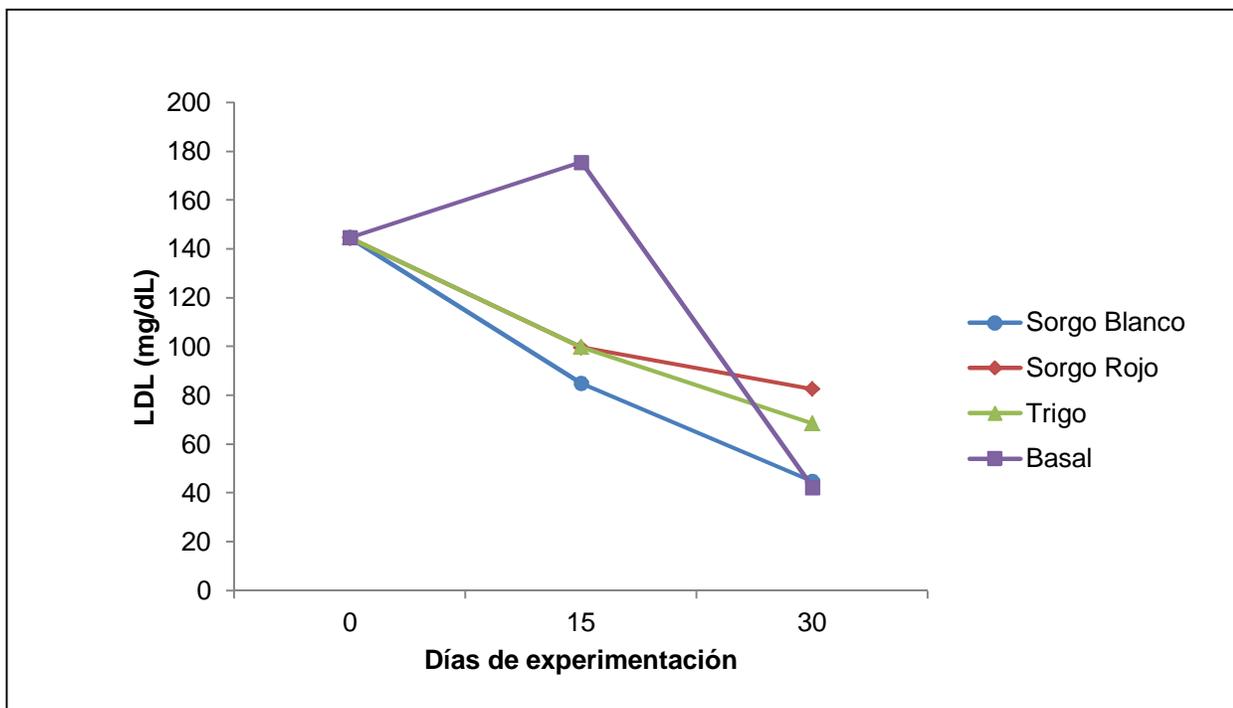


Figura 17. Comportamiento del LDL-colesterol con respecto al tiempo en las diferentes dietas experimentales para el tratamiento de inducción.

HDL-Colesterol

Desde una perspectiva global y conforme a los resultados obtenidos del análisis estadístico realizado (Tabla 8), se observa que existen diferencias significativas en la concentración de HDL-colesterol (HDL) entre los tratamientos de inducción y sin inducción, siendo mayor en los tratamientos SI (76.51 mg/dL) que en los de CI (50.60 mg/dL).

En la Figura 18 se expresa el comportamiento de HDL por tratamiento y dieta de prueba durante el periodo de experimentación. De manera general, se observa que para ambos tratamientos, la concentración de HDL en sangre aumentó a los 15 días de experimentación y a partir de ahí disminuyó hacia el final del experimento, excepto en las dietas basal y trigo del tratamiento SI, que aumentaron durante todo el experimento.

La Figura 18 (A) muestra el comportamiento de HDL respecto al tiempo para el tratamiento CI. Se observa que las dietas con mejor respuesta, es decir, las que produjeron mayor aumento en este parámetro respecto al valor presentado el día cero (13.9 mg/dL) fueron, Basal (63.75 mg/dL) y SR (54.75 mg/dL), seguido de T (50.75 mg/dL) y SB (49 mg/dL). Los resultados del análisis estadístico realizado para las cuatro dietas de prueba muestran que a pesar de los aumentos, estas diferencias no hubo diferencias significativas entre sí.

La Figura 18 (B) muestra el comportamiento de HDL para el tratamiento SI. Se observa que en todas las dietas experimentales HDL (27.85 mg/dL) aumentó, presentándose las concentraciones más altas en las dietas de SB (100.33 mg/dL), Basal (96 mg/dL), T (87.16 mg/dL) y SR (70.33 mg/dL), los cuales son valores correspondientes al día 30 de experimentación. Estadísticamente, las dietas de prueba en el tratamiento sin inducción no presentaron diferencias significativas entre sí, excepto la dieta SB con respecto a SR, siendo SR significativamente menor.

Según Marquart *et al.* (2007) el consumo de granos enteros contribuye al incremento de colesterol HDL. El efecto del consumo de granos enteros en el mejoramiento de los niveles de lípidos en sangre, y en este caso en particular del colesterol HDL, pueden atribuirse a componentes presentes tales como fibra, polifenoles y fitoesteroles, los cuales se encuentran concentrados en las fracciones de salvado de sorgo (Awika y Rooney, 2004).

Las HDL o lipoproteínas de alta densidad son partículas que en su proporción contienen más proteínas y menos lípidos, característica que les confiere su alta densidad. En lugar de transportar colesterol por todo el cuerpo, como lo hacen las LDL, estas lipoproteínas funcionan como una aspiradora absorbiendo todo el colesterol posible. Su función es recoger el colesterol sobrante de los tejidos y de las células y devolverlo al hígado, el cual lo reabsorbe y lo utiliza para producir bilis, o bien, lo recicla. Este mecanismo es el que parece explicar por qué los niveles elevados de HDL en sangre se asocian a un bajo riesgo de padecer enfermedades

cardiovasculares. Además, las HDL contienen moléculas antioxidantes que pueden prevenir la oxidación o la autoagregación del colesterol LDL en la pared arterial y reducir de esta forma la aterogenicidad de estas lipoproteínas (Freeman y Junge, 2005). La paraoxanosa 1 (PON1), estrechamente unida a la partícula de HDL, es la enzima que confiere las propiedades antioxidantes a esta lipoproteína y su actividad está intensamente regulada por factores ambientales como la dieta, la actividad física y ciertos fármacos, así como por factores genéticos. Esta enzima representa probablemente el mecanismo principal de inhibición de la oxidación de las LDL y de las propias HDL, proceso directamente involucrado en las fases iniciadoras de la arteriosclerosis (Tomás *et al.*, 2004). Esta enzima, *In vitro* neutraliza peróxido de hidrógeno y lípidos peroxidados libres o presentes en lesiones ateroscleróticas o en LDL parcialmente oxidadas (Aviram *et al.*, 1998; Aviram *et al.*, 2000; Watson *et al.*, 1999; Watson *et al.*, 1995).

Las evidencias experimentales de la función antioxidante de la PON1 se apoyan en estudios realizados en ratones doble *knock-out* para PON1/apoE que han demostrado *in vivo* que esta enzima es eficaz para inhibir la oxidación de las LDL (Shih *et al.*, 2000). Actualmente se sabe que la concentración baja de HDL suele ir acompañada de una actividad o concentración de PON1 disminuidas (Tomás *et al.*, 2004). De esta manera se puede afirmar que el aumento de HDL obtenido en las dietas de prueba es médicamente significativo.

Los cambios en el estilo de vida afectan los niveles de HDL; el ejercicio físico puede elevarlos, mientras que la obesidad o el tabaco pueden reducirlos. En cuanto a la alimentación, en general, las dietas ricas en grasas que elevan el LDL también aumentan el HDL, mientras que las bajas en grasas reducen los niveles de ambos (Freeman y Junge, 2005). Este comportamiento puede ser debido, en parte, a que la producción de HDL va a la par con la proporción de ingesta de colesterol (Fuster *et al.*, 1997). Sin embargo, si se escogen cuidadosamente los alimentos, se puede seguir una dieta que reduzca el LDL sin que afecte al HDL (Freeman y Junge, 2005).

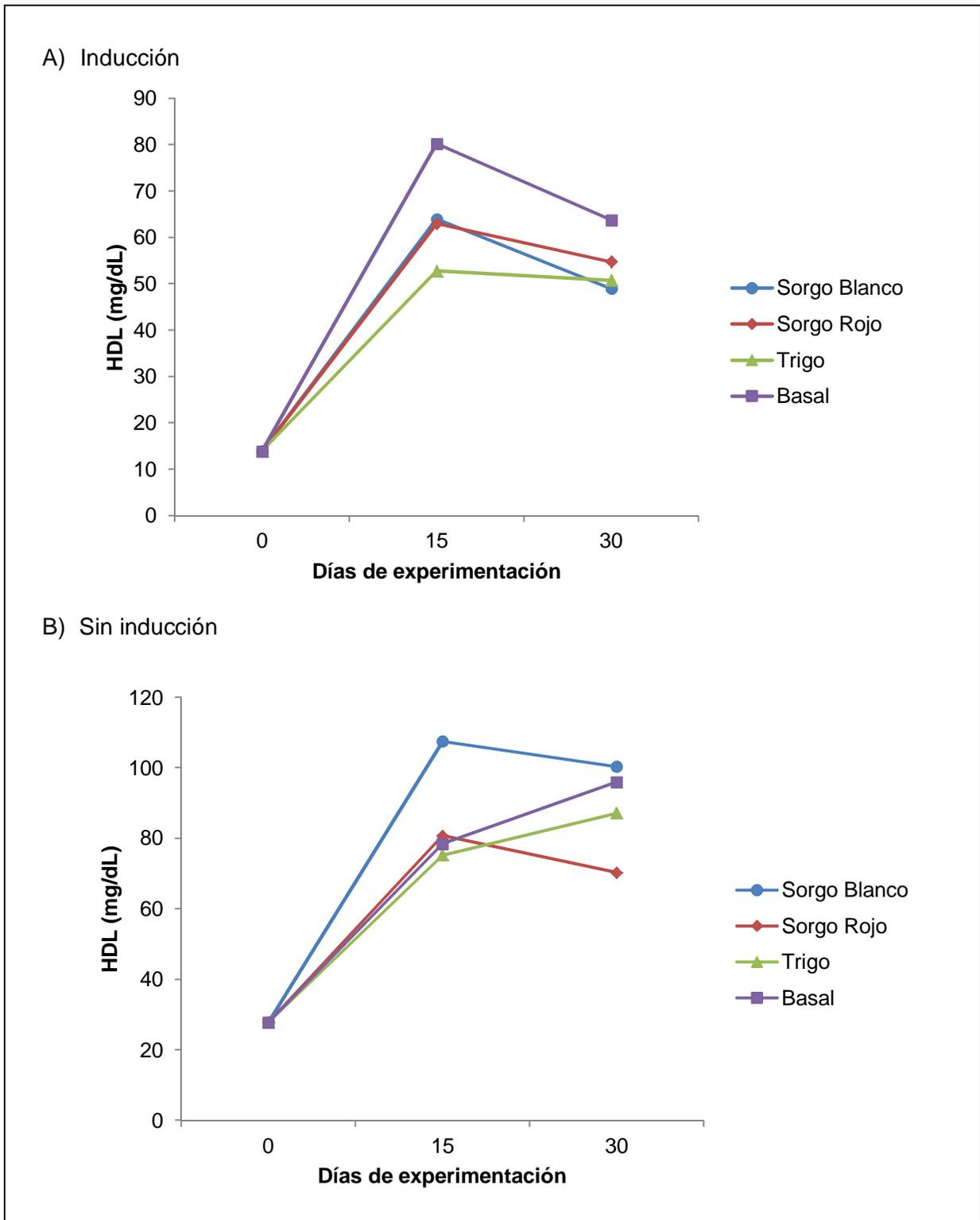


Figura 18. Comportamiento del HDL-Colesterol con respecto al tiempo en las diferentes dietas experimentales para los tratamientos con inducción (A) y sin inducción (B).

Índice Aterogénico

De manera general y de acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis estadístico (Tabla 8), se observó que hubo diferencia significativa entre los tratamientos de inducción y sin inducción, siendo mayor en el primero (3.63) que en el segundo (0.57).

La Figura 19 muestra el comportamiento del índice aterogénico con respecto al tiempo en las diferentes dietas experimentales en el tratamiento de CI. De manera general se observa que las dietas de prueba presentaron la misma tendencia, es decir, se observa una considerada disminución del IA en todos los casos.

El valor de IA al inicio del experimento, día cero, fue de 11.11, se puede observar que en las cuatro dietas de prueba hubo una disminución significativa en el día quince con respecto al día cero; en la Figura 17 se pueden observar los valores de IA al final del experimento, en orden ascendente fueron: basal (0.84), SB (1.21), SR (1.80) y T (1.78), siendo la dieta basal la que presentó menor valor de IA. El comportamiento de los datos de IA para las dietas en el tratamiento SI fue similar (datos no mostrados).

En la Tabla 9 se puede observar que las dietas de prueba no son significativamente diferentes. El IA indica el potencial de obstrucción de las arterias, herramienta útil para detectar riesgo de presentar enfermedad coronaria prematura, de forma que existe una relación proporcional entre el IA y el riesgo de enfermedad coronaria (Irurita *et al.*, 2007), por lo tanto, en términos médicos, la disminución de IA en cada una de las dietas experimentales es fisiológicamente importante.

Este bioensayo se llevó a cabo con el fin de determinar la influencia de los fitoquímicos y la fibra presentes en el salvado de sorgo rojo y blanco sobre el metabolismo del colesterol en ratas con hipercolesterolemia inducida, los cuales son conocidos por ejercer un efecto benéfico en la salud, es decir, reducir los niveles de colesterol total, LDL y triglicéridos y aumentar los niveles de colesterol HDL.

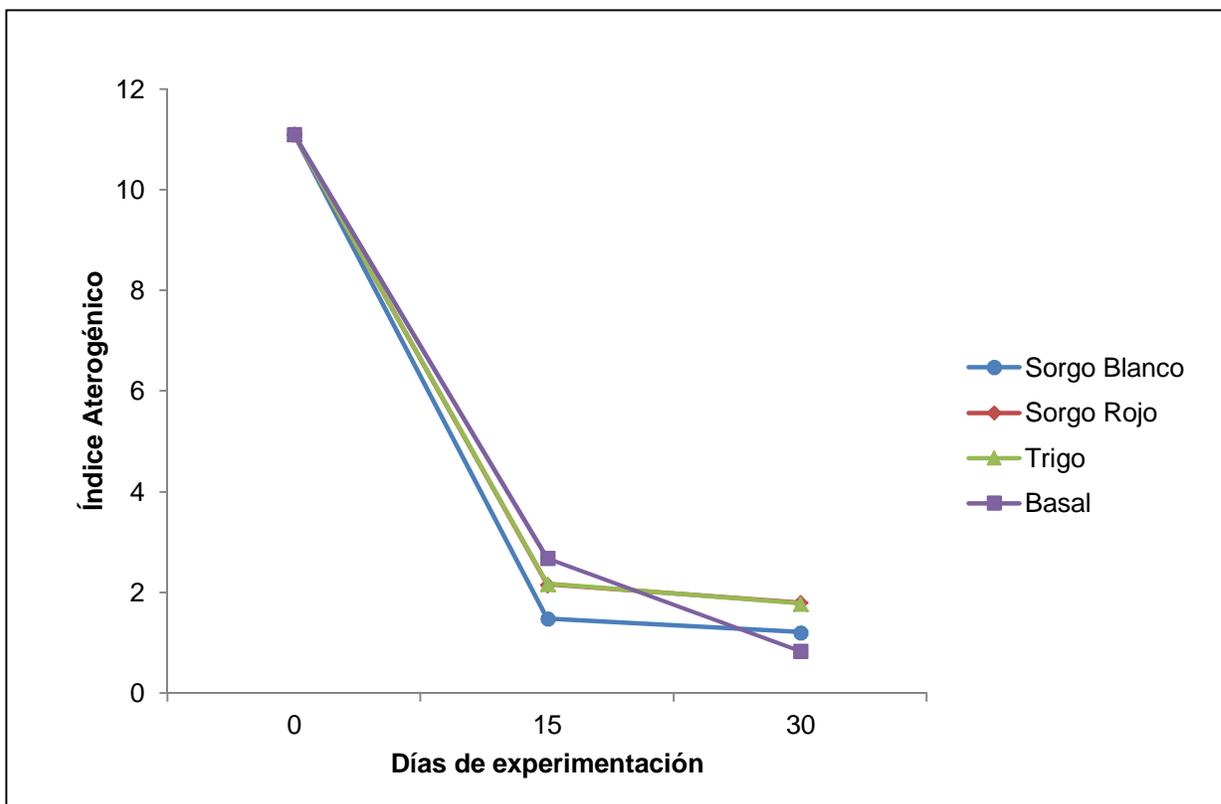


Figura 19. Comportamiento del índice aterogénico con respecto al tiempo en las diferentes dietas experimentales para el tratamiento de inducción.

En este estudio, se muestra que una dieta con un alto contenido en grasas saturadas (15%) y colesterol (1%) incrementa los niveles de CT, LDL y TG en plasma en ratas, coincidiendo con lo reportado previamente por Auger *et al.* (2005). Además, los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que la incorporación de salvado de sorgo rojo y blanco a dietas con alto contenido de grasas saturadas y colesterol reducen significativamente los niveles de CT, LDL e IA, y aumentan el valor de HDL.

Como se ha mencionado, son escasos los estudios *in vivo* a cerca del efecto del salvado de sorgo sobre las ECV, específicamente en la hiperlipidemia. De acuerdo a la bibliografía revisada se conoce que el sorgo es una buena fuente de fibra y fitoquímicos, tales como los compuestos fenólicos, fitoesteroles y policosanoles; Es así como se llegó a cuatro vertientes en las que se encuentra sustento científico los resultados obtenidos en el presente estudio, y los cuales se discuten a continuación

Efecto de la Fibra Dietaria

Numerosos estudios epidemiológicos han demostrado que la fibra dietaria, en especial su fracción, soluble disminuye el riesgo de enfermedades cardiovasculares (Escudero y González, 2006), este papel protector de la fibra está relacionado, principalmente, con su capacidad de reducir los niveles de colesterol plasmático (Gil, 2010).

Uno de los objetivos de este trabajo fue evaluar el efecto del consumo de salvado de sorgo de los tipos rojo y blanco sobre el perfil lipídico en ratas con hipercolesterolemia inducida, como se puede observar en los resultados, de manera general, las dietas experimentales disminuyeron los niveles de colesterol total, LDL-colesterol y aumentaron los niveles de HDL-colesterol y triglicéridos, por lo tanto, este comportamiento encuentra justificación en el principal componente del salvado de sorgo, la fibra dietaria.

En los resultados se puede observar que la dieta de prueba que presentó mejores resultados fue la dieta de sorgo blanco, ya que presentó los niveles más bajos de colesterol total, LDL-colesterol, triglicéridos y el valor más bajo de índice aterogénico. Este efecto se atribuye a que el salvado de sorgo blanco presentó mayor contenido de fibra dietaria total (FDT), 28.50%. En cambio, la dieta de sorgo rojo obtuvo el nivel más favorable de HDL-colesterol, siendo el salvado de sorgo rojo el que mostró menor valor de FDT, 24.36%.

Por otra parte, en la fracción de fibra dietaria soluble (FDS), el análisis de fibra dietaria arrojó como resultado en sorgo blanco y sorgo rojo 1.61% y 1.67% respectivamente. La FDA ha autorizado la recomendación que establece que los alimentos que contienen 0.75-1.7 g de FDS por ración puede reducir el riesgo de enfermedad cardiaca. Se ha estimado que por cada gramo de FDS que se incorpora en la dieta se consigue un descenso de los niveles séricos de LDL-colesterol de 0.029 mmol/l (Gil, 2010).

Según lo propuesto por Rods *et al.* (2002) el aumento en los triglicéridos pudo deberse principalmente al exceso de peso y a la edad avanzada de los sujetos de experimentación, debido que los triglicéridos aumentan a medida que aumentan el peso y la edad, lo que pudo provocar un descenso más lento de los niveles de este parámetro, por otra parte, Páez (2009)

afirma que las fibras solubles dietéticas (particularmente pectinas y gomas) reducen el colesterol sérico, pero no cambian los triglicéridos.

Son varios los mecanismos por los cuales la fibra disminuye los niveles de colesterol, según Williams (2002), el más importante es el secuestro de los ácidos biliares, cuando la fibra llega al duodeno secuestra los ácidos biliares en el interior de su matriz; como consecuencia, aumenta su excreción con las heces, disminuyendo la cantidad que llega al hígado por la vía enteropática.

El secuestro de los ácidos biliares por la fibra tiene un doble efecto en el metabolismo del colesterol. En primer lugar, para compensar su pérdida en las heces, las células hepáticas se ven forzadas a formar más ácidos biliares primarios a partir del colesterol y si este incremento de la degradación del colesterol no es compensado mediante un aumento de su síntesis, tienen que captarlo del colesterol circulante, por lo que los niveles plasmáticos disminuyen (Nishina y Freedland, 1990). En segundo lugar, cuando las sales biliares son adsorbidas por la fibra dietaria en el intestino delgado, se forman interacciones micelares que impiden que las grasas se puedan emulsionar, y, como consecuencia, disminuirá la adsorción de colesterol biliar, del procedente de los alimentos y de todos los lípidos en general (Gil, 2010).

Otro de los mecanismos es la disminución de la absorción de colesterol. El colesterol de la dieta es secuestrado por los geles viscosos de la fibra en el estómago y el duodeno, por lo que su solubilización micelar por los ácidos biliares es más difícil, lo cual, sumado al hecho de que existe una menor cantidad de ácidos biliares libres, disminuye el transporte de colesterol hacia la membrana absorptiva. Cuando el colesterol es capaz de alcanzar la membrana del yeyuno, su absorción se ve comprometida debido al aumento de su espesor de la capa superficial del agua que baña la mucosa. Por último, cuando el colesterol secuestrado por la fibra alcanza al ciego, la microbiota bacteriana destruye la fibra soluble y se libera el colesterol, pero a este nivel la capacidad de absorción es muy reducida (Gil, 2010).

Según Nishina y Freedland (1990) y Brown *et al.* (1999) la inhibición de la síntesis de colesterol es otro de los mecanismos empleados por la fibra dietaria, la principal enzima que regula la síntesis de colesterol hepático es la β -hidroxi- β -metilglutaril coenzima A reductasa (HMG-CoA reductasa). Esta enzima cataliza la producción de mevalonato a partir de HMG-CoA y su actividad aumenta cuando existe una baja concentración de colesterol en los hepatocitos.

La fermentación bacteriana de la fibra en el colon da como resultado un aumento en la producción de ácidos grasos de cadena corta como el ácido propiónico (Williams, 2002). En diversos estudios experimentales se ha observado que el propionato, tras ser absorbido desde el colon a la circulación portal, puede actuar inhibiendo a la HMG-CoA reductasa, disminuyendo la síntesis de nuevo colesterol (Gil, 2010).

Además de estos mecanismos, la fibra dietaria, principalmente la proveniente de cereales, en este caso del sorgo rojo y blanco, se encuentra acompañada de compuestos que aportan efectos benéficos y disminuyen el riesgo de enfermedad cardiovascular, como fenólicos y policosanoles (Awika y Rooney, 2004).

Efecto de los Compuestos Fenólicos

El sorgo contiene diferentes clases de compuestos fenólicos. Todos los sorgos (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) contienen ácidos fenólicos y la mayoría de estos contienen flavonoides. Sólo las variedades con testa pigmentada presentan taninos condensados. Los tipos y cantidades de compuestos fenólicos presentes en el grano de sorgo están controlados genéticamente (Dykes y Rooney, 2006).

En el caso particular de las muestras de sorgo utilizadas durante esta investigación (Silo Max y Hegari), es posible aseverar que compuestos fenólicos presentes son solo ácidos fenólicos y flavonoides, ya que son variedades sin testa.

Los ácidos fenólicos están formados de dos tipos de compuestos: los ácidos hidroxibenzoicos e hidroxicinámicos (Dykes y Rooney, 2006). Entre los ácidos fenólicos más comunes encontrados en el sorgo se encuentran los ácidos siríngico, protocatéquico, cafeico, *p*-cumárico y sinapínico (Hahn, 1984; Waniska *et al.*, 1989). Como en el resto de los cereales, los ácidos fenólicos del sorgo se encuentran mayormente concentrados en el salvado (Awika y Rooney, 2004). Hahn *et al.* (1983) han identificado que los ácidos fenólicos en el sorgo se encuentran tanto en forma libre como en forma ligada. Los ácidos fenólicos libres se encuentran en las capas más externas del grano (pericarpio, aleurona y testa), en tanto que los ácidos fenólicos ligados se asocian con la pared celular (Hahn *et al.*, 1984).

Los ácidos fenólicos son los compuestos fenólicos más fácilmente absorbidos debido a su pequeño tamaño molecular (Scalbert *et al.*, 2002). De acuerdo a Hahn *et al.* (1983), la mayoría de los ácidos fenólicos presentes en el sorgo se encuentran en forma esterificada con el ácido ferúlico. Este enlace forma compuestos fenólicos que, hasta hace poco tiempo, se consideraban indisponibles para su absorción en el organismo humano. Sin embargo, Kroon *et al.* (1997) y Andreasen *et al.* (2001) demostraron que esterasas del colon humano (principalmente de origen microbiano) son capaces de romper el enlace éster que une a los diferulatos y otros ácidos hidroxicinámicos de los salvados de los cereales. Esto significa que los ácidos fenólicos presentes están potencialmente biodisponibles y que la actual contribución a la salud de dichos ácidos fenólicos asociada al consumo de granos enteros puede ser aún mayor que lo que previamente se ha asumido (Awika y Rooney, 2004).

Las antocianinas son las principales clases de flavonoides estudiados en sorgo. A diferencia de las antocianinas comunes, las antocianinas del sorgo son únicas debido a que éstas no contienen el grupo hidroxilo en la posición 3 del anillo C y por ello son llamadas 3-deoxiantocianinas (Awika *et al.*, 2004 a, b; Gous, 1989; Mazza y Brouillard, 1987; Iacobucci y Sweeny, 1983). Las dos 3-deoxiantocianidinas más comunes en el sorgo son la amarilla, apigeninidina, y la naranja, luteolinidina (Awika *et al.*, 2004; Gous, 1989; Nip y Burns, 1971; Wu y Prior, 2005). Awika *et al.* (2004) reportaron que la apigeninidina representa un 19% del total de antocianinas presentes en sorgo rojo. Asimismo, los sorgos con pericarpio rojo tienen compuestos flavan-4-ol, tales como luteoforol y apiforol, los cuales son producidos a partir de las flavanonas y pueden ser precursores de las antocianidinas del sorgo (Wharton y Nicholson, 2000).

La modificación oxidativa de las lipoproteínas de baja densidad es uno de los mecanismos fundamentales que se propone, se asocian para iniciar y perpetuar el desarrollo de la aterosclerosis, padecimiento producido por un exceso de colesterol en sangre y precursor de otras ECV (Mendivil *et al.*, 2002). Aparentemente, el LDL se filtra en la pared arterial, donde participa en el desarrollo de las lesiones ateroscleróticas. Cerca de 20 años atrás se comenzó a poner en evidencia en varios estudios que las partículas de LDL modificadas químicamente eran más fácilmente captadas por los macrófagos (Goldstein *et al.*, 1979; Mendivil *et al.*, 2002). Se demostró después que, dentro de dichas modificaciones químicas, la oxidación era la más susceptible de aumentar la captación del LDL por los macrófagos, siendo ésta una modificación intermedia clave y crucial para promover la aterogénesis (Steinberg *et al.*, 1989; Fuster *et al.*,

1997) y que todos los tipos celulares presentes en la placa ateromatosa eran capaces de modificar oxidativamente al LDL (Steinberg *et al.*, 1989; Mendivil *et al.*, 2002). Surgió entonces la llamada hipótesis oxidativa de la aterosclerosis, que ha sido comprobada experimentalmente (Mendivil *et al.*, 2002). Las LDL oxidadas pueden ser también un agente patológico en sí mismas y ponen en marcha varios elementos del proceso aterogénico. Se ha demostrado que las LDL oxidadas son quimiotácticas y pueden reclutar monocitos a la pared arterial donde pueden ser transformados en células espumosas. También pueden ser citotóxicas y lesionar las células endoteliales y/o favorecer la secreción celular de varias moléculas potencialmente aterogénicas (Fuster *et al.*, 1997; Mendivil *et al.*, 2002).

Los antioxidantes son compuestos capaces de donar electrones a un receptor que carece de los mismos si se encuentran en estado reducido. En el plasma humano y en el interior de las células del organismo existe un amplio repertorio de antioxidantes. La dieta por sí misma contiene varios antioxidantes que pueden potencialmente inhibir la oxidación del LDL. Algunos de ellos son las vitaminas C, E y el beta caroteno (Mendivil *et al.*, 2002).

Se conoce que los compuestos fenólicos actúan de manera positiva sobre las enfermedades cardiovasculares (Hoffman y Garewal, 1995; Pace-Asciak *et al.*, 1995) debido a que ejercen un poderoso efecto antioxidante sobre los lípidos en sangre. Éstos inhiben la peroxidación lipídica, actuando como un limpiador de los radicales peroxilo y protegiendo así al colesterol LDL de la oxidación (O'Byrne *et al.*, 2002). Estos compuestos también poseen una gran variedad de otras actividades biológicas, tales como reducción de lípidos en plasma, lo cual puede deberse a la regulación de la expresión del receptor del LDL (Kuhn *et al.*, 2004), inhibición hepática de la síntesis de lípidos (Theriault *et al.*, 2000), secreción de lipoproteínas (Borradaile *et al.*, 2003), e incremento en la eliminación de colesterol vía ácido biliar (Del Bas *et al.*, 2005).

Existen compuestos antioxidantes cuyos mecanismos de acción antiaterogénicos han sido mejor estudiados, tal es el caso de las vitaminas C y E. Sin embargo, existen una serie de antioxidantes, entre los cuales se encuentran los compuestos polifenólicos, cuyo papel en el mantenimiento de la salud humana aún no ha sido esclarecido, pero que están comenzando a ser investigados con mucho interés y constituyen una importante alternativa. Los antioxidantes comparten algunos mecanismos antiaterogénicos comunes y algunos de ellos poseen otros particulares. Existen mecanismos extracelulares e intracelulares. Con respecto a los primeros,

los antioxidantes actúan inhibiendo la peroxidación lipídica en las LDL, medida como el retraso en la aparición de dienos conjugados tras la adición de un ion metálico catalizador, generalmente Cu^{++} , a las LDL *in vitro* (Retsky y Frei, 1995; Princen *et al.*, 1992; Fuller *et al.*, 1996; Jialal y Grundy, 1991; Jialal y Grundy, 1992; Mendivil *et al.*, 2002). En relación con los mecanismos intracelulares, los antioxidantes disminuyen la oxidación de las LDL no sólo por aumentar su resistencia intrínseca a la oxidación, sino también porque disminuyen la producción de especies reactivas de oxígeno por parte de las células presentes en la placa aterosclerótica. Esto ha sido ampliamente demostrado para células en cultivo. Varios de ellos reducen la expresión de moléculas de adhesión por parte de las células endoteliales ante el estímulo de las LDL oxidadas, evitando el reclutamiento selectivo de monocitos en los sitios propensos a lesión (Martin *et al.*, 2000; Cominacini *et al.*, 1997). Además, algunos antioxidantes tienen la propiedad de disminuir la citotoxicidad de las LDL oxidadas sobre las células endoteliales y evitar así la apoptosis de éstas previniendo la acumulación de detritus celulares y aumento de la respuesta inflamatoria localizada para cada ateroma (Reid y Mitchinson, 1993).

En el presente estudio se encontró que la concentración de fenoles totales en las muestras de salvados de SR y SB fueron de 9.29 mg EAG/g y 3.56 mg EAG/g, respectivamente, los cuales son semejantes a los reportados por Awika y Rooney (2004) y Awika *et al.* (2005). Asimismo, Awika y Rooney (2004) reportaron las actividades antioxidantes de dichos salvados por el método de capacidad de absorción del radical oxígeno (ORAC, por sus siglas en inglés), siendo de 710 $\mu\text{mol ET/g}$ de muestra en peso seco para SR y 64 $\mu\text{mol ET/g}$ de muestra en peso seco para SB, valores que superan de 3 a 5 veces a los reportados para grano entero de estas variedades de sorgo. En general, de acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación, SB fue la dieta de prueba que presentó mejores resultados, es decir, disminución de CT, LDL, TG e IA, excepto en el aumento de HDL, en el cual SR fue superior. Sin embargo, cabe destacar que el comportamiento observado en cada parámetro fue similar en la dieta de SR, aunque en menor medida respecto a SB.

La capacidad antioxidante de un alimento depende de la naturaleza y concentración de los compuestos antioxidantes naturales presentes en él (Cao *et al.*, 1995; Pieri *et al.*, 1994; Pineda *et al.*, 1999). Hahn *et al.* (1983) reportan el perfil de ácidos fenólicos presentes en grano de sorgo blanco y rojo. Los datos muestran grandes diferencias en la concentración de los ácidos *p*-cumárico, ferúlico y protocatequico, mostrando sorgo blanco concentraciones superiores de estos compuestos tanto en su forma libre como ligada. Los ácidos ferúlico y *p*-

cumárico son los que se encuentran en mayor concentración en ambos sorgos, ambos predominando en sorgo blanco. Recientemente, se ha demostrado que el ácido ferúlico ejerce un efecto protector contra la peroxidación de los lípidos (Giardi *et al.*, 2010). Kwon *et al.* (2010) en su ensayo con ratones deficientes de apolipoproteína-E encontraron que la administración de ácido ferúlico condujo a concentraciones significativamente menores de colesterol total. También se observó que aumentaron significativamente los niveles de enzimas antioxidantes, tales como superóxido dismutasa, catalasa, glutatión reductasa y peroxidasa, y paraoxonasa. Asimismo, Lee *et al.* (2003) indicaron que la administración de ácido *p*-cumárico produjo una reducción de los niveles de colesterol total en ratas alimentadas con una dieta rica en colesterol. Adicionalmente, este compuesto aumentó la concentración de HDL en plasma, pero disminuyó el colesterol hepático y los niveles de triglicéridos (Bergeron *et al.*, 2012). Es posible que la actividad reductora en los niveles lipídicos que ejerce el salvado de sorgo blanco se deba también a estos compuestos fenólicos presentes. Sin embargo, el mecanismo preciso que implica estos efectos necesita ser elucidado en estudios futuros.

Klopfestein *et al.* (1981) reportaron un efecto reductor de colesterol de grano de sorgo bajo en taninos al administrarse a cobayos en un 58% de la dieta. Este efecto fue mayor que el producido por trigo, avena y mijo perla. Más recientemente, Cho *et al.* (2000) encontraron que extractos etéreos con hexano de sorgo y mijo inhiben la enzima 3-hidroxi-3-metilglutaril CoA reductasa (HMG-CoA) en las células microsomales del hígado en ratas en una forma que depende de la dosis administrada de dichos extractos. También encontraron que la excreción fecal de ácido biliar, así como los niveles de colesterol HDL, incrementaron sin presentarse ningún cambio en el colesterol total cuando fueron administrados grano entero de sorgo, mijo o alforfón a ratas a un 30% de la dieta.

En estudios similares al presente, Rooney *et al.* (1992) observaron que al añadir salvado de sorgo a una dieta de ratas hasta obtener un 6% de fibra de sorgo, tanto sorgos con alto contenido de taninos como sorgos sin taninos, y salvado de trigo incrementaron colesterol sérico total en sangre en ratas, comportamiento distinto al observado en este experimento. Sin embargo, ellos no midieron los cambios en colesterol HDL y LDL, tal y como aquí se hizo. Es evidente que se necesitan más datos acerca de cómo los diversos tipos de sorgo afectan el metabolismo del colesterol en estudios controlados con animales.

Efecto de los Policosanoles y Fitosteroles

Por otro lado, existen datos que muestran que el sorgo es una fuente importante de fitoesteroles y policosanoles (Dalton y Mitchell, 1959; Seitz, 1977; Avato *et al.*, 1990; Singh *et al.*, 2003) a partir de los cuales es necesario estimular la investigación en este campo.

Los fitosteroles son compuestos parecidos al colesterol y son componentes estructurales de las membranas celulares de las plantas. En los granos de cereales éstos se encuentran mayormente en el salvado y son extraíbles como parte de las ceras del aceite del salvado. Existe interés en estos compuestos debido a que son conocidos como promotores de la salud cardiovascular, especialmente por sus propiedades para reducir el colesterol (Awika y Rooney, 2004). En los cereales, los fitoesteroles existen en formas libres como ésteres de ácidos grasos o ácidos hidroxicinámicos (usualmente ferulato), o conjugados con azúcares (principalmente glucosa). En el sorgo los fitosteroles libres identificados incluyen sitosterol, campesterol y estigmasterol (Avato *et al.*, 1990). Las formas esterificadas (sitosteil *trans*-ferulato, sitosteril glucósido, sitosteril oleato), con cadenas de ácidos grasos de C₁₄-C₂₄ (Avato *et al.*, 1990) y ferulatos (Singh *et al.*, 2003) han sido también identificados en el sorgo. Estos compuestos no son tan comúnmente estudiados como los esteroides, pero se ha encontrado que ofrecen beneficios similares a la salud (Awika y Rooney, 2004). Singh *et al.*, (2003) reportaron niveles totales de fitosterol de 0.5 mg/g en el grano de sorgo. Asimismo, se encontró un 0.7-0.8 mg/g de fitosteroles en la fracción de fibra aislada del sorgo utilizando el procedimiento de molienda húmeda para maíz.

Los policosanoles son una mezcla de alcoholes alifáticos de alto peso molecular (también llamados alcoholes grasos) que son parte de los componentes de las ceras de las plantas. En el sorgo, las ceras comprenden cerca del 0.2% del grano, generalmente mayor que en otros cereales. Los policosanoles representan un 19-46% de la cera del sorgo, con octacosanol (C₂₈) y triacontanol (C₃₀) como los más abundantes (Bunger y Kummerow, 1951; Dalton y Mitchell, 1959; Seitz 1977; Avato *et al.*, 1990). Esto se traduce a aproximadamente 38-92 mg de policosanoles en cada 100 g de grano de sorgo (Awika y Rooney, 2004). Estos compuestos tienen un potencial reductor de colesterol comparable al de las estatinas (medicamentos actualmente populares pero caros y nocivos) (McCarthy, 2002). Castano *et al.* (2002) reportó que 10 mg al día de policosanol había sido más efectivo que 20 mg/día de

lovastatina en la reducción de los niveles de colesterol LDL y aumento de colesterol HDL. Otros estudios han mostrado beneficios similares (revisados por Gouni-Berthold y Berthold, 2002; Pepping, 2003). Estos autores también reportan que los policosanoles no presentan efectos tóxicos aún a dosis altas y están destinados a ganar importancia como alternativas dietarias naturales, seguras y efectivas versus la medicación con estatinas. La eficiencia y potencial económico de los policosanoles presentes en el sorgo debe ser investigada (Awika y Rooney, 2004).

El sorgo contiene una diversidad de fitoquímicos con el potencial de impactar significativamente a la salud humana. Los fitoquímicos en este cereal muestran una alta actividad antioxidante *in vitro* contra diferentes radicales libres comparable con la de frutas y verduras, y son capaces de ofrecer beneficios similares atribuidos a frutas y vegetales. Información acerca de cómo los fitoquímicos del sorgo afectan la salud humana es escasa. Estudios con animales indican que el consumo de sorgo promueve una mejor salud cardiovascular que otros cereales. Es absolutamente esencial el determinar si los efectos positivos observados en animales pueden ser reproducidos en humanos, dado que las enfermedades cardiovasculares son la principal causa de muerte en el occidente (Awika y Rooney, 2004).

Es conocido que las soluciones más efectivas para la mayoría de los padecimientos de la salud se encuentran en los componentes naturales de los alimentos que consumimos, más que en costosas intervenciones médicas. El reto es encontrar e incorporar un balance de ingredientes funcionales en los alimentos consumidos diariamente a niveles adecuados. El sorgo, que actualmente es subutilizado, es definitivamente digno de consideración como una fuente potencial de fitoquímicos promotores de la salud para nuestros alimentos (Awika y Rooney, 2004).

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos de la investigación realizada en el presente trabajo se llegó a las siguientes conclusiones:

El análisis químico proximal realizado demostró, por un lado, que el contenido de proteína en grano entero de sorgo blanco fue mayor que en sorgo rojo, y que el porcentaje de grasa en ambos fue igual. Por otro lado, en cuanto a los salvados, SR y SB fueron iguales en su contenido de proteína pero menores respecto al control de salvado de trigo; el porcentaje de grasa en SR, SB y T fue igual.

Los valores encontrados de fibra dietaria y la concentración de fenoles totales en los salvados de SR y SB indican que esta fracción puede ser utilizada como buena fuente de fibra y antioxidantes.

Dentro de la evaluación de calidad proteica del grano entero de sorgos rojo y blanco, las determinaciones de ganancia en peso y NPR tuvieron el mismo comportamiento, presentándose en ambas, un valor mayor en SR que en SB.

La dieta de SB presentó mayores porcentajes de digestibilidad de materia seca y digestibilidad aparente y verdadera de nitrógeno que la dieta de SR, mostrando valores comparables a los de la dieta control de caseína.

Estos resultados sugieren que es posible utilizar el grano entero de los sorgos rojo y blanco, mediante su transformación tecnológica, como alimento para consumo humano.

En cuanto al efecto del consumo de los salvados de sorgo rojo y blanco sobre el perfil lipídico de ratas con hipercolesterolemia inducida, las dietas de SB y SR disminuyeron los niveles de CT, TG, LDL e IA y aumentaron HDL, respecto a los valores inducidos. Sin embargo, la dieta de SB mostró mejores resultados al disminuir en mayor proporción los niveles de CT, TG, LDL e IA, respecto a SR. Por otro lado, la dieta de SR obtuvo mejor respuesta en el aumento de HDL que las dietas de SB, T y basal.

Los resultados obtenidos proponen que el salvado de los granos de sorgo rojo y blanco puede ser considerado un ingrediente nutracéutico prometedor debido al potencial que muestran los componentes presentes en esta fracción de suministrar efectos protectores contra enfermedades cardiovasculares.

RECOMENDACIONES

Como perspectiva a futuro, se recomiendan dos posibles aplicaciones del grano de sorgo, su uso alimentario directo y la extracción de sus componentes activos para uso comercial:

1. Uso de grano entero de sorgo para producción de harinas integrales que puedan ser incorporadas a productos de panificación para consumo humano, ya que las variedades de sorgo utilizadas en el estudio son libres de taninos.
2. Uso de grano entero de sorgo para producción de alimentos para celíacos, por ser libre de gluten.
3. Utilización de salvado de sorgo como buena fuente de fibra para el enriquecimiento y fortificación de alimentos.
4. Separación y utilización de componentes presentes en salvado de sorgo como ingredientes funcionales en alimentos para usos terapéuticos y para mejoramiento de atributos sensoriales (como color) en alimentos.

En lo que concierne a la parte práctica de este trabajo, recomendamos:

1. Un mayor tiempo de experimentación con las dietas de prueba, ya que puede ser útil para obtener resultados significativos.
2. Realizar la determinación de LDL-colesterol en el laboratorio.
3. Elaboración de trabajos posteriores, que se enfoquen de manera individual en cada uno de los fitoquímicos del sorgo, es decir, estudios *in vivo* que estudien más a profundidad acerca de la acción benéfica y el mecanismo de acción de los fitoquímicos presentes en el salvado de sorgo y su efecto en la salud humana ya que información sobre estos temas es escasa.
4. Realizar estudios para determinar si el efecto benéfico del sorgo sobre enfermedades cardiovasculares visto en animales puede ser reproducible en humanos.

BIBLIOGRAFÍA

- [AACC] AACC International. 1999. Approved Methods of Analysis, 11th Ed. St. Paul, MN, U.S.A.
- Abdalla AA, El-Tinay AH, Mohamed BE, Abdalla AH. 2003. In: Proximate composition and the content of sugars, amino acids and anti nutritional factors of three sorghum varieties. Agriculture Research Center, King Saud University. Res. Bult. 125:5-19.
- Ahuja VP, Sing J, Naik MS. 1995. En: El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana. Colección FAO: Alimentación y Nutrición, N° 27. Roma, Italia. p 74.
- Ali HL, Harland BF. 2003. In: Factors affecting protein digestibility. J. Cereal Science. 38(1):117-131.
- Anderson JW. 2004. In: Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. Phytochemistry 65:1199-1221.
- Anderson JW. 2007. In: Nutraceutical Uses of Sorghum Bran (*Sorghum bicolor*). B.S., Georgia College & State University. Athens, GA. Ch.1. p 2.
- Andreasen MF, Kroon PA, Williamson G, Garcia-Conesa M. 2004. In: Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. Phytochemistry 65:1199-1221.
- [AOAC] AOAC International. 2005. Official methods of analysis, 18th Ed., 2005. Gaithersburg, Maryland, USA.
- Aranceta J, Foz M, Gil B, Jover E, Mantilla T, Millán J, Monereo S, Moreno B. 2007. Dieta y riesgo cardiovascular. Estudio DORICA II. Madrid, España: Editorial Médica Panamericana S.A. p 167.
- Auger C, Teissedre PL, Gérain P, Lequeux N, Bornet A, Serisier S, Besançon P, Caporiccio B, Cristol JP, Rouanet JM. 2005. Dietary wine phenolics catechin, quercetin, and resveratrol efficiently protect hypercholesterolemic hamsters against aortic fatty streak accumulation. J Agric Food Chem. 53(6):2015-2021.
- Avato P, Bianchi G, Murelli C. 1990. Aliphatic and cyclic lipid components of Sorghum plant organs. Phytochemistry. 29:1073-1078.

- Avato P, Bianchi G, Murelli C. 2004. In: Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. *Phytochemistry*. 65 (2004):1214.
- Aviram M, Hardak E, Vaya J, Mahmood S, Milo S, Hoffman A. 2004. En: Función antioxidante de las lipoproteínas de alta densidad: un nuevo paradigma en la arteriosclerosis. *Rev Esp Cardiol*. 57(6):557-569.
- Aviram M, Rosenblat M, Bisgaier CL, Newton RS, Primo-Parmo SL, La Du BN. 2004. En: Función antioxidante de las lipoproteínas de alta densidad: un nuevo paradigma en la arteriosclerosis. *Rev Esp Cardiol*. 57(6):557-569.
- Awika JM, McDonough CM, Rooney LW. 2005. Decorticating sorghum to concentrate healthy phytochemicals. *J Agric Food Chem*. 53(16):6230-6234.
- Awika JM, Rooney LW, Waniska RD. 2004a. Anthocyanins from black sorghum and their antioxidant properties. *J Food Chem*. 90 (1-2):293-301.
- Awika JM, Rooney LW, Waniska RD. 2004b. Properties of 3-deoxyanthocyanins from sorghum. *J Agric Food Chem*. 52:4388-4394.
- Awika JM, Rooney LW, Waniska RD. 2005. In: Decorticating sorghum to concentrate healthy phytochemicals. *J Agric Food Chem*. 53(16):6230-6234.
- Awika JM, Rooney LW, Wu X, Prior RL, Cisneros-Zevallos L. 2005. In: Decorticating sorghum to concentrate healthy phytochemicals. *J Agric Food Chem*. 53(16):6230-6234.
- Awika JM, Rooney LW. 2004. Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. *Phytochemistry*. 65:1199-1221.
- Awika JM. 2003. Antioxidant properties of sorghum. Ph.D. Dissertation. Texas A&M University: College Station, TX.
- Axtell JD, Kirleis AW, Hassen MM, Mertz ET, Munck L. 1995. En: El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana. Colección FAO: Alimentación y nutrición. No 27. p 73.
- Bach KE, Munck L, Eggum B0. 1995. En: El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana. Colección FAO: Alimentación y nutrición. No 27. p 75.

- Bach Knudsen KE, Munck L. 2003. In: Factors affecting protein digestibility. *J Cereal Science*. 38(1):117-131.
- Badui DS. 1993. *Química de los Alimentos*. 3ª ed. Ed. Longman de México Editores. México. p 117.
- Badui DS. 2006. *Química de los Alimentos*. 4ta ed. Ed. Longman de México editores. México. p 119.
- Belton PS, Delgadillo I, Halford NG, Shewry PR. 2009. In: Digestibility of protein and starch from sorghum (*Sorghum bicolor*) is linked to biochemical and structural features of grain endosperm. *J Cereal Science*. 49(7):73-82.
- Bender AE. 1994. *Nutrición y tecnología de los alimentos*. Zaragoza, España: Ed. Acribia S.A. p 296.
- Bender AE, Doell BH. 1957. Biological evaluation of proteins: a new aspect. *British J Nutr*. 11(2):140-148.
- Bergeron C, Carrier DJ, Ramaswamy S. 2012. *Biorefinery Co-Products. Phytochemicals, primary metabolites and value-added biomass processing*. West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd. p 170.
- Block RJ, Mitchell MM. 1995. En: *El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana*. Colección FAO: Alimentación y Nutrición, N° 27. Roma, Italia. p 69.
- Borradaile NM, De Dreu LE, Barrett PHR, Behrsin CD, Huff MW. 2003. Hepatocyte apoB-containing lipoprotein secretion is decreased by grapefruit flavonoid, naringenin, via inhibition of MTP-mediated microsomal triglyceride accumulation. *Biochemistry*. 42:1283-1291.
- Brown L, Rosner B, Willett WW, Sacks FM. 1999. Cholesterol-lowering effects of dietary fiber: a meta-analysis. *Am J Clin Nutr*. 69:30-42.
- Bunger WB, Kummerow FA. 2004. In: *Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health*. *Phytochemistry* 65:1199-1221.

- Burdette AL. 2007. Nutraceutical Uses of Sorghum Bran (*Sorghum bicolor*). B.S., Georgia College & State University. Athens, GA. Ch.1. p 2, 4.
- Burleson CA, Cowley WR, Otey G. 1995. En: El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana. Colección FAO: Alimentación y Nutrición, Nº 27. Roma, Italia. p 69.
- Burr ML, Fehily AM, Gilbert JF. 1999. In: Cholesterol-lowering effects of dietary fiber: a meta-analysis. Am J Clin Nutr. 69:30-42.
- Byington RP, Jukema JW, Salonen JT. 1999. In: Cholesterol-lowering effects of dietary fiber: a meta-analysis. Am J Clin Nutr. 69:30-42.
- Canett-Romero R, Robles-Sánchez RM. 1992. Manual de técnicas nutricionales de calidad de proteína *in vivo*. Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos de la Universidad de Sonora. Departamento de Ciencias Químico Biológicas de la Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.
- Cao G, Wu A, Wang H, Prior R. 1999. En: Capacidad antioxidante y potencial de sinergismo entre los principales constituyentes antioxidantes de algunos alimentos. Rev Cubana Aliment Nutr. 13(2):104-111.
- Castano G, Menendez R, Mas R, Amor A, Fernandez JL, Gonzalez RL, Alvarez E. 2004. In: Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. Phytochemistry 65:1199-1221.
- Cedillo-Sebastian G. 2005. Nutraceutical tortillas and tortilla chips prepared with bran from specialty sorghums. M. S. Thesis. Texas A&M University: College Station, TX.
- Cervera P. 2004. Alimentación y Dietoterapia. 4 ed. Ed. McGraw-Hill. Madrid, España. p 64-67.
- Chen JW, Anderson JW. 1986. Hipocolesterolemia effects of soluble fiber in dietary fiber. Edited by Vahouny GV, Kritchevsky D. Ed. Plenum Press, New York. p 566.
- Chibber BAK, Mertz ET, Axtell JD. 2003. In: Factors affecting protein digestibility. J Cereal Science. 38(1):117-131.
- Cho SH, Choi Y, Ha TY. 2004. In: Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. Phytochemistry 65:1199-1221.

- Church DC, Pond WG. 1974. Basic animal nutrition and feeding. D & B Books: Corvallis, OR, USA.
- Cominacini L, Garbin U, Pacini AF, Davoli A, Campagnola M, Contessi GB. 2002. En: Antioxidantes y enfermedad vascular. Clin Invest Arterioscl. 14(1):26-40.
- Contreras LE, Santiago GJ. 2011. Obesidad, Síndrome Metabólico y su Impacto en las Enfermedades Cardiovasculares. Revista Biomédica. Doctorado en Ciencias Biomédicas, Instituto de Investigaciones Biológicas, Universidad Veracruzana, Xalapa Veracruz. Vol. 22. No. 3. p 103.
- Dalton JL, Mitchell HL. 2004. In: Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. Phytochemistry 65:1199-1221.
- Del Bas JM, Fernández-Larrea J, Blay M, Ardèvol A, Salvadó MJ, Arola L, Bladé C. 2005. Grape seed procyanidins improve atherosclerotic risk index and induce liver CYP7A1 and SHP expression in healthy rats. FASEB Journal. 19:479-481.
- Deosthale YG, Nagarajan V, Visweswar Rao. 1995. En: El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana. Colección FAO: Alimentación y Nutrición, N° 27. Roma, Italia. p 69.
- Devli TM. 2004. Bioquímica: libro de texto con aplicaciones químicas. 4ta ed. Ed. Reverte. España. p 741.
- Díaz Portillo J, Fernández del Barrio MT, Paredes Salido F. 1997. Aspectos básicos de bioquímica clínica. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos. p 63.
- Domanski C, Giorda LM, Feresin O. 1997. Composición y calidad del grano de sorgo. EEA INTA Manfredi, Arg., Cuaderno de Actualización N° 7, 47-50.
- Douglas KR. 2003. Cáncer de colon. Colegio Americano de Gastroenterología. Indianápolis, Indiana.
- Duodu KG, Taylor JRN, Belton PS, Hamaker BR. 2003. Factors affecting protein digestibility. J Cereal Science. 38(1):117-131.

- Dvorkin MA, Cardinali DP, Lermoli RF. 2010. Best & Taylor: Bases Fisiológicas de la Práctica Médica. 14 ed. Ed. Médica Panamericana. p 82.
- Dykes L, Rooney LW. 2006. Sorghum and millet phenols and antioxidants. *J Cereal Science*. 44:236-251.
- Elmalik M, Klopfenstein CF, Hosney RC, Bates LS. 1995. En: *El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana*. Colección FAO: Alimentación y nutrición. No 27. Roma, Italia. p 74.
- Escudero Álvarez, González Sánchez. 2006. La Fibra Dietética. *Nutrición Hospitalaria, Unidad de Dietética y Nutrición*. Hospital La Fuenfría. Madrid, Nutr. Hosp. (2006) 21 (Supl.2) 61-72.
- Expert Panel on Detection, Evaluation, and Treatment of High Blood Cholesterol in Adults. Summary of the second report of the National Cholesterol Education Program (NCEP) Expert Panel on Detection, Evaluation, and Treatment of High Blood Cholesterol in Adults (Adult Treatment Panel II). 1999. In: *Cholesterol-lowering effects of dietary fiber: a meta-analysis*. *Am J Clin Nutr*. 69:30-42.
- Ezeogu LI, Duodu KG, Emmanbux MN, Taylor JRN. 2009. In: *Digestibility of protein and starch from sorghum (Sorghum bicolor) is linked to biochemical and structural features of grain endosperm*. *J Cereal Science*. 49(7):73-82.
- Ezeogu LI, Duodu KG, Taylor JRN. 2009. In: *Digestibility of protein and starch from sorghum (Sorghum bicolor) is linked to biochemical and structural features of grain endosperm*. *J Cereal Science*. 49(7):73-82.
- [FAO] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 1995. *El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana*. Colección FAO: Alimentación y Nutrición, N° 27. Roma, Italia. Cap.1. p 21, 22, 55-87, 93-95
- [FAO] Food American Organization. 1995. *El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana*. Colección FAO: Alimentación y nutrición. No 27. Roma, Italia. Cap.1. p 21, 22, 55-87, 93-95.
- FAO/WHO. 1981. Report of the joint FAO/WHO Comitee. Energy and protein requirements. Report N° 53. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.

- FAOSTAT. 2007. In: Nutraceutical Uses of Sorghum Bran (*Sorghum bicolor*). B.S., Georgia College & State University. Athens, GA.Ch. 1. p 4.
- Fernández MC. 2010. La Fibra Dietaria en la Prevención del Riesgo Cardiovascular. Unidad de Lípidos y Aterosclerosis, Servicio de Medicina Interna, Hospital Universitario. México. p 5.
- Financiera Rural. 2009. Monografía del Sorgo. Dirección General Adjunta de Planeación Estratégica y Análisis Sensorial. México. p 1, 2.
- Food and agriculture organization & international crops research institute for the semi-arid tropics (ICRISAT).1996. The world soghum and millet economies: facts and trade division and the socioeconomic and policy international crops research institute for the semi-arid tropics. Andra Pradesh: ICRISAT; Rome: FAO.
- Freeman MW, Junge C. 2005. Guía de la Facultad de Medicina de la Universidad de Harvard. Colesterol: Cómo controlar el nivel de LDL en nuestro organismo. Barcelona, España: Ediciones Paidós Ibérica, S.A. p 17, 20, 25, 26, 28.
- Frick MH, Elo MO, Haapa K. 1997. En: Aterosclerosis y enfermedad arterial coronaria. Barcelona, España: Springer-Verlag Ibérica, S.A. p 55.
- Fuller CJ, Grundy SM, Norkus EP, Jialal I. 2002. En: Antioxidantes y enfermedad vascular. Clin Invest Arterioscl. 14(1):26-40.
- Fuster V, Ross R, Topol EJ. 1997. Aterosclerosis y enfermedad arterial coronaria. Barcelona, España: Springer-Verlag Ibérica, S.A. p 47, 55.
- García-Esteba RM, Guerra-Hernández E, García-Villanova B. 2003. In: Factors affecting protein digestibility. J Cereal Science. 38(1):117-131.
- Garcilaso R. 1995. Bioquímica Metabólica. 2 ed. Ed. Unison. Hermosillo, Sonora. p 279.
- Gassem MAA, Osman MA. 2003. Proximate composition and the content of sugars, amino acids and anti nutritional factors of three sorghum varieties. Agriculture Research Center, King Saud University. Res. Bult. 125:5-19.

- Ghose TK, Ghosh P. 2003. *Biotechnology in India I. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlin, Germany. p 228.
- Giardi MT, Rea G, Berra B. 2010. *Bio-Farms for Nutraceuticals. Functional Food and Safety Control by Biosensors*. New York, USA: Landes Bioscience and Springer Science+Business Media. p 31.
- Gil Hernández A. *Tratado de Nutrición Tomo I: Bases Fisiológicas y Bioquímicas de la Nutrición*. 2da ed. Ed. Medica Panamericana. Madrid. p 235-252.
- Glennie CW. 2003. In: *Factors affecting protein digestibility*. *J Cereal Science*. 38(1):117-131.
- Goldstein HL, Ho YK, Basu SK. 2002. En: *Antioxidantes y enfermedad vascular*. *Clin Invest Arterioscl*. 14(1):26-40.
- Gouni-Berthold I, Berthold HK. 2002. *Policosanol: clinical pharmacology and therapeutic significance of a new lipid- lowering agent*. *American Heart Journal*. 143:356-365.
- Gous F. 2005. In: *Decorticating sorghum to concentrate healthy phytochemicals*. *J Agric Food Chem*. 53(16):6230-6234.
- Gous F. 2006. In: *Sorghum and millet phenols and antioxidants*. *J Cereal Science*. 44:236-251.
- Gu L, Kelm M, Hammerstone JF, Beecher G, Cunnigham D, Vannozzi S, Prior L. 2004. In: *Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health*. Elsevier Ltd. 65 (2004): 1200.
- Gujer R, Magnolato D, Self R. 2004. In: *Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health*. Elsevier Ltd. 65 (2004): 1200.
- Gupta RK, Haslam E. 1978. *Plant proanthocyanidins, part 5, polyphenols*. *J ChemSoc Perkin Trans 1* 5:982-986.
- Gupta RK, Haslam E. 2004. In: *Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health*. Elsevier Ltd. 65 (2004): 1200.

Guyton A, May J. 2001. Tratado de Fisiología Médica. 10 ed. Ed. McGraw-Hill Interamericana. México, DF. p 128.

Hagerman AE, Riedl KM, Alexander Jones G, Sovik KN, Ritchard NT, Hartzfeld PW, Riechel TL. 1998. High molecular weight plant polyphenolics (tannins) as biological antioxidants. *J Agric Food Chem.* 45(5):1887-1892.

Hahn DH, Faubion JM, Rooney LW. 2006. In: Sorghum and millet phenols and antioxidants. *J Cereal Science.* 44:236-251.

Hahn DH, Rooney LW, Earp CF. 1984. Tannins and phenols in sorghum. *Cereal Foods World* 29:776-779.

Hahn DH, Rooney LW, Faubion JM. 2004. In Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. *Phytochemistry.* 65 (2004): 1199-1221.

Hahn DH, Rooney LW. 2005. In: Decorticating sorghum to concentrate healthy phytochemicals. *J Agric Food Chem.* 53(16):6230-6234.

Hahn DH. 2004. In: Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. *Phytochemistry* 65:1199-1221.

Hamaker BR, Bugusu BA. 2009. In: Digestibility of protein and starch from sorghum (*Sorghum bicolor*) is linked to biochemical and structural features of grain endosperm. *J Cereal Science.* 49(7):73-82.

Hernández Rodríguez M, Sastre Gallego A. 1999. Tratado de nutrición. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos, S.A. Cap. 1. p 331.

Hoffman RM, Garewal HS. 2000. In: Effects of dietary phenolic compounds on tocopherol, cholesterol, and fatty acids in rats. *Lipids.* 35(4):427-435.

Hoseney RC. 1994. Principles of Cereal Science and Technology. 2nd edition. Minnesota. American Association of Cereal Chemists, Inc. p 21-24, 125-145.

Hoyos LC, Valencia MA. 1997. Alimentación y Nutrición Familiar Secretaria de Educación y Cultura. DIF Sonora. p 21-30.

- Huang KT, Weller CL, Cuppett SL, Hanna MA. 2005. In: Decorticating sorghum to concentrate healthy phytochemicals. *J Agric Food Chem.* 53(16):6230-6234.
- Hubbard JE, Hall HH, Earle FR. 1995. En: *El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana*. Colección FAO: Alimentación y Nutrición, N° 27. Roma, Italia. p 86.
- Hulse JH, Laing EM, Pearson OE. 1995. En: *El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana*. Colección FAO: Alimentación y Nutrición, N° 27. Roma, Italia. p 73.
- Hulse JH, Laing EM, Pearson OE. 2003. In: Factors affecting protein digestibility. *J Cereal Science.* 38(1):117-131.
- INIFAP. 2010. Nuevos genotipos de sorgo y maíz para productores del norte de México.
- Ink SL, Hurt HD. 1987. Nutritional implications of gums. *Food Technol.* 41:1:77.
- Irurita M, López L, Irurita J, Martínez de Saavedra MT, López JA, Chirino GR, Sánchez GF. 2007. Utilidad del Índice Aterogénico en la Predicción de Enfermedad Coronaria Prematura. *Clin Invest Arterioscl.* 19:136-42, vol. 19 num. 03.
- Jacobs DR, Meyer HE, Solvoll K. 2007. In: *Nutraceutical Uses of Sorghum Bran (Sorghum bicolor)*. B.S., Georgia College & State University. Athens, GA. Ch. 1. p 1.
- Jacobs DR, Slavin J, Marquart L. 1995. Whole grain intake and cáncer. *Nutr. Cancer.* 24: 221-229.
- Jambunathan R, Sing U, Subramanian. 1995. En: *El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana*. Colección FAO: Alimentación y Nutrición, N° 27. Roma, Italia. p 73.
- Jambunathan R. 1995. En: *El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana*. Colección FAO: Alimentación y nutrición. No 27. Roma, Italia. p 73, 83.
- Jensen MK. 2007. In: *Nutraceutical Uses of Sorghum Bran (Sorghum bicolor)*. B.S., Georgia College & State University. Athens, GA. Ch. 1. p 1.

- Jialal I, Grundy SM. 2002. En: Antioxidantes y enfermedad vascular. Clin Invest Arterioscl. 14(1):26-40.
- Kaluza, McGrath, Roberts, Schroeder. 2005. Sorghum phenolic extracts: Their storage stability and antioxidant activity in sunflower oil. University of Pretoria. South Africa. Ch. 2. p 38.
- Kamal-Eldin A, Frank J, Razdan A, Tengblad S, Basu S, Vessby B. 2000. Effects of dietary phenolic compounds on tocopherol, cholesterol, and fatty acids in rats. Lipids. 35(4):427-435.
- Kannel WB, Castelli WD, Gordon T, McNamara PM. 1999. In: Cholesterol-lowering effects of dietary fiber: a meta-analysis. Am J Clin Nutr. 69:30-42.
- Kent NL, Evers AD. 1994. Technology of Cereals: An Introduction for Students of Food Science and Agriculture. 4th edition. Oxford: Elsevier Science Ltd. p 23-25.
- Kimber CT. 2007. In: Nutraceutical Uses of Sorghum Bran (*Sorghum bicolor*). B.S., Georgia College & State University. Athens, GA. Ch.1. p 4.
- Klopfenstein CF, Hosney RC. 2009. In: Digestibility of protein and starch from sorghum (*Sorghum bicolor*) is linked to biochemical and structural features of grain endosperm. J Cereal Science. 49(7):73-82.
- Klopfenstein CF, Varriano-Marston E, Hosney RC. 2004. In: Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. Phytochemistry 65:1199-1221.
- Knuckles BE, Kuzmicky DD, Betschart AA. 2003. In: Factors affecting protein digestibility. J Cereal Science. 38(1):117-131.
- Kroon PA, Faulds CB, Ryden P, Robertson JA, Williamson G. 2004. In: Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. Phytochemistry 65:1199-1221.
- Krueger CG, Vestling MA, Reed JD. 2004. In: Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. Elsevier Ltd. 65 (2004): 1200.

- Kuhn DJ, Bums AC, Kazi A, Duo QP. 2004. Direct inhibition of the ubiquitin-proteasome pathway by ester bond-containing green tea polyphenols is associated with increased expression of sterol regulatory element-binding protein 2 and LDL receptor. *Biochimica et Biophysica Acta*. 1628:1-10.
- Kurien PP, Narayanarao M, Swaminathan M, Subrahmanyam V. 1995. En: *El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana*. Colección FAO: Alimentación y nutrición. No 27. p 75.
- Kushi LH, Lew RA, Stare FJ. 1999. In: *Cholesterol-lowering effects of dietary fiber: a meta-analysis*. *Am J Clin Nutr*. 69:30-42.
- Kushi LH, Meyer KA, Jacobs DR. 2004. In: *Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health*. *Phytochemistry* 65:1199-1221.
- Kwaku GD. 2000. *Role of Grain Organisational Structure in Sorghum Protein Digestibility*. University of Pretoria. Pretoria, South Africa. Ch. 1. p 1.
- Kwon EY, Do GM, Cho YY, Park YB, Jeon SM, Choi MS. 2010. Anti-atherogenic property of ferulic acid in apolipoprotein E-deficient mice fed Western diet: Comparison with clifibrate. *Food Chem Tox*. 48(8-9):2298-2303.
- Lee JS, Jeon SM, Park EM, Huh TL, Kwon OS, Lee MK, Choi MS. Cinnamate supplementation enhances hepatic lipid metabolism and antioxidant defense systems in high cholesterol-fed rats. *J Med Food*. 6(3):183-191.
- Lichtenstein AH. 2007. In: *Nutraceutical Uses of Sorghum Bran (Sorghum bicolor)*. B.S., Georgia College & State University. Athens, GA. Ch. 1. p 1.
- Liebman B. 2008. Fiber free for all, not all fibers are equal. *Nutr Act Health Lett*.3-5.
- Lipid Research Clinics Program. 1984. The lipid research clinics coronary primary prevention trial results: I. Reduction in the incidence of coronary heart disease. *JAMA*. 251:351-364.
- [LRCP] Lipid Research Clinics Program. 1984. The lipid research clinics coronary primary prevention trial results: II. The relationship of reduction in incidence of coronary heart disease to cholesterol lowering. *JAMA*. 251:365-374.

- Liu SM. 2007. In: Nutraceutical Uses of Sorghum Bran (*Sorghum bicolor*). B.S., Georgia College & State University. Athens, GA. Ch. 1. p 1.
- MacLean WC Jr, López de Romana G, Gastanaduy A, Graham GG. 1995. En: El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana. Colección FAO: Alimentación y nutrición. No 27. Roma, Italia. p 75.
- Mardlaw MG, Hampl SJ, Di Silvestro AR. 2004. Perspectivas en Nutrición. 4ª ed. Ed. McGraw-Hill. p 175.
- Marfo EK, Simpson BK, Idowu JS, Oke OL. 2003. In: Proximate composition and the content of sugars, amino acids and anti nutritional factors of three sorghum varieties. Agriculture Research Center, King Saud University. Res. Bult. 125:5-19.
- Marquart L, Jacobs D, McIntosh G, Reicks M, Poutanen K. 2007. Whole grains and health. Iowa, USA: Blackwell Publishing. p 40.
- Martin KR, Wu D, Meidani M. 2002. En: Antioxidantes y enfermedad vascular. Clin Invest Arterioscl. 14(1):26-40.
- Masana Marín L. 2009. Comprender el colesterol. Barcelona, España: Editorial Amat, S.L. p 14.
- Mazza G, Brouillard R. 2006. In: Sorghum and millet phenols and antioxidants. J Cereal Science. 44:236-251.
- McCarthy MF. 2002. Policosanol safely down-regulates HMG-CoA reductase . potential as a component of the Esselstyn regimen. Medical Hypotheses. 59:268-279.
- Mellen PB, Walsh TF, Herrington DM. Whole grain intake and cardiovascular disease: A meta-analysis. Nutr Metab Cardiovasc Dis. [Internet]. 2007 [cited 2012 August 15]. Available from: doi:10.1016/j.numecd.2006.12.008
- Mendivil CO, Sierra ID, Pérez CE, Hernández Abad B. 2002. Antioxidantes y enfermedad vascular. Clin Invest Arterioscl. 14(1):26-40.
- Meri VA. 2005. Fundamentos de Fisiología de la Actividad Física y el Deporte. 1ra ed. Ed. Médica Panamericana. Madrid. p 63.

- Miranda RA. 2006. Determinación del consumo de fibra dietaria en tres poblaciones del estado de México. La fibra dietaria en la nutrición. Tesis profesional UAEM Estado de México.
- Mnembuka BV, Eggum BO. 1993. The nutritive value of some selected Tanzanian plant food sources. *Plant Food for Human Nutrition* 44(1):1-10.
- Murray R, Granner D. 1992. *Bioquímica de Harper*. 12 ed. Ed. El Manual Moderno. México, DF. p 740.
- Murray RK, Bender DK, Botham KM, Kennelly PJ, Rodwell VW, Weil PA. 2009. *Harper: Bioquímica Ilustrada*. 28 ed. Ed. McGraw-Hill. p 224, 225, 226, 227.
- Naik MS. 1995. En: *El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana*. Colección FAO: Alimentación y Nutrición, N° 27. Roma, Italia. p 74.
- Nawar IA, Clark HE, Pickett RC, Hegsted DM. 1995. En: *El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana*. Colección FAO: Alimentación y nutrición. No 27. p 74.
- Neucere NJ, Sumrell G. 2003. In: *Proximate composition and the content of sugars, amino acids and anti nutritional factors of three sorghum varieties*. Agriculture Research Center, King Saud University. *Res. Bult.* 125:5-19.
- Nip WK, Burns EE. 1969. Pigment characterization in grain sorghum red varieties. *Cereal Chem.* 43:490-496.
- Nip WK, Burns EE. 2006. In: *Sorghum and millet phenols and antioxidants*. *J Cereal Science.* 44:236-251.
- Nishina MP, Freedland RA. 1990. The effects of dietary fiber feeding on cholesterol metabolism in rats. *Metabolism and hormonal Regulation*. School of veterinary of medicine, University of California. Davis, CA. *J. Nutr.* 800-805.
- Ó Byme DJ, Devaraj S, Grundy SM, Jialal I. 2002. Comparison of antioxidant effects of Concord grape juice flavonoids and a-tocopherol on markers of oxidative stress in healthy adults. *Am J Clin Nutr.* 76:1367-1374.

- Olds BS. 1986. Dietary fiber: Physical and chemical properties, methods of analysis and physical effects. *Food Technol.* 40 (2) 104-110.
- Pace-Asciak CR, Hahn RS, Diamandis EP, Soleas G, Goldberg DM. 2000. In: Effects of dietary phenolic compounds on tocopherol, cholesterol, and fatty acids in rats. *Lipids.* 35(4):427-435.
- Páez HG. 2009. Beneficio de la Fibra Dietaria en Enfermedades Crónico-Degenerativas. Universidad Veracruzana, facultad de nutrición. Xalapa Veracruz.
- Pellet PL. 1978. Protein quality evaluation revisited. *Food Technol.* 32(5):60-79.
- Pepping J. 2003. Policosanol. *American Journal of Health-system Pharmacy.* 60:1112-1114.
- Pieri C, Marra M, Moroni F. 1999. En: Capacidad antioxidante y potencial de sinergismo entre los principales constituyentes antioxidantes de algunos alimentos. *Rev Cubana Aliment Nutr.* 13(2):104-111.
- Pineda Alonso D, Salucci M, Lázaro R, Maiani G, Ferro-Luzzi A. 1999. Capacidad antioxidante y potencial de sinergismo entre los principales constituyentes antioxidantes de algunos alimentos. *Rev Cubana Aliment Nutr.* 13(2):104-111.
- Princen HM, Van Poppel G, Vogelzang C, Buytenhek R, Kok FJ. 2002. En: Antioxidantes y enfermedad vascular. *Clin Invest Arterioscl.* 14(1):26-40.
- Purseglove AE. 1995. En: El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana. Colección FAO: Alimentación y nutrición. No 27. Cap. 1. p 5.
- Reid VC, Mitchinson MJ. 2002. En: Antioxidantes y enfermedad vascular. *Clin Invest Arterioscl.* 14(1):26-40.
- Reiser S. 1987. Metabolic effect of dietary pectins related to human health. *Food Technol.* 41 (2): 91.
- Retsky KL, Frei B. 2002. En: Antioxidantes y enfermedad vascular. *Clin Invest Arterioscl.* 14(1):26-40.

- Rods J, Trilla GA, Albanell MJ. 2002. Manual de Terapeutica Medica. Ed. Masson. Bcelona España. p 79.
- Rooney LW, Serna-Saldivar SO. 1995. En: El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana. Colección FAO: Alimentación y Nutrición, N° 27. Roma, Italia. p 83.
- Rooney LW, Serna-Saldivar SO. 2003. In: Proximate composition and the content of sugars, amino acids and anti nutritional factors of three sorghum varieties. Agriculture Research Center, King Saud University. Res. Bult. 125:5-19.
- Rooney TK, Rooney LW, Lupton JR. 2004. In: Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. Phytochemistry 65:1199-1221.
- Rooney TK, Rooney LW, Lupton JR. 2005. In: Decorticating sorghum to concentrate healthy phytochemicals. J Agric Food Chem. 53(16):6230-6234.
- Sacks FM, Pfeffer MA, Moye LA. 1999. In: Cholesterol-lowering effects of dietary fiber: a meta-analysis. Am J Clin Nutr. 69:30-42.
- Scalbert A, Morand C, Manach C, Remesy C. 2004. In: Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. Phytochemistry 65:1199-1221.
- Seitz LM. 2004. In: Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. Phytochemistry 65:1199-1221.
- Serna-Saldívar SO. 1996. Química, almacenamiento e industrialización de los cereales. AGT Editor. México.
- Shawrang P, Sadeghi AA, Behgar M, Zarechahi H, Shahhoseini G. Study of chemical compositions, anti-nutritional contents and digestibility of electron beam irradiated sorghum grains. Food Chem. [Internet]. 2010. [cited 2012 August 15]. Available from: doi: 10.1016/j.foodchem.2010.09.010.
- Shih DM, Xia YR, Wang XP, Miller E, Castellani LW, Subbanagounder G. 2004. En: Función antioxidante de las lipoproteínas de alta densidad: un nuevo paradigma en la arteriosclerosis. Rev Esp Cardiol. 57(6):557-569.
- Shin JK. 2005. E vitamer fraction in rice bran inhibits autooxidation of colesterol and linoleic acid in emulsified system during incubation. J Food Science. 4(70):286-291.

Sikabbubba RM. 1995. En: El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana. Colección FAO: Alimentación y nutrición. No 27. Roma, Italia. p 75.

Sikwese EF. 2005. Sorghum phenolic extracts: Their storage stability and antioxidant activity in sunflower oil. University of Pretoria. South Africa. Ch. 1. p1. Ch. 2. p 38, 39, 53.

Sileno V. 1995. En: El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana. Colección FAO: Alimentación y nutrición. No 27. p 74.

Silveira RM. 2003. Alimentos Funcionales y Nutrición Óptima. S. P. 3 (77): 317-330.

Singh V, Moreau EA, Hicks KB. 2005. In: Decorticating sorghum to concentrate healthy phytochemicals. J Agric Food Chem. 53(16):6230-6234.

Singh V, Moreau RA, Hicks KB. 2004. In: Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. Elsevier Ltd. 65 (2004):1214.

Situación Actual y Perspectiva de la Producción de Sorgo en México 1992-2004.

Slavin JL. 2002. Dietary fiber and body weight. Nutr. 21: 411-418.

Slavin J. 2007. In: Nutraceutical Uses of Sorghum Bran (*Sorghum bicolor*). B.S., Georgia College & State University. Athens, GA. Ch.1. p 2.

Slavin JL, Jacobs D, Marquart L. 2004. In: Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. Phytochemistry 65:1199-1221.

Sotelo A, Mendoza J, Argote EM. 2002. Contenido de ácido fítico en algunos alimentos crudos y procesados. Validación de un método colorimétrico. Journal of the Mexican Chemical Society. 46(4):301-306.

Steffen LM. 2007. In: Nutraceutical Uses of Sorghum Bran (*Sorghum bicolor*). B.S., Georgia College & State University. Athens, GA. Ch. 1. p 1.

- Steinberg D, Parthasarathy S, Carew TE, Khoo JC, Witztum JL. 1989. Beyond cholesterol: modifications of low-density lipoprotein that increase its atherogenicity. *N Engl J Med.* 320:915-923.
- Sweeny JG, Iacobucci GA. 2006. In: Sorghum and millet phenols and antioxidants. *J Cereal Science.* 44:236-251.
- Tejón RJ, Garrido PA, Blanco GD, Gutiérrez VC, Mendoza OC, Ramírez RJ. *Fundamentos de Bioquímica Metabólica.* 2006. 2da edición. Editorial Tebar. Madrid. p 129-132, 146.
- [THI] Texas Heart Institute [Internet]. Texas Heart Institute at St. Luke's Episcopal Hospital; 2011 [citado 15 Agosto 2012]. Disponible en: http://www.texasheartinstitute.org/HIC/Topics_Esp/HSmart/cholspan.cfm
- Therault AG, Wang Q, Van Indestine SC, Chen B, Franke AA, Adeli K. 2000. Modulation of hepatic lipoprotein synthesis and secretion by taxifolin, a plant flavonoid. *J Lipid Research.* 41:1969-1979.
- Tomás M, Latorre G, Sentí M, Marrugat J. 2004. Función antioxidante de las lipoproteínas de alta densidad: un nuevo paradigma en la arteriosclerosis. *Rev Esp Cardiol.* 57(6):557-569.
- Torres Morera L. 2002. *Tratado de Cuidados Críticos y Emergencias Tomo I.* Ed. Aran. Madrid, España. p 42.
- U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. 2012. USDA National Nutrient Database for Standard Reference, Release 24. Nutrient Data Laboratory available from: <http://www.ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/list>
- U.S. Grains Council. 2009. In: Digestibility of protein and starch from sorghum (*Sorghum bicolor*) is linked to biochemical and structural features of grain endosperm. *J Cereal Science.* 49(7):73-82.
- Van der Kamp JW, Asp NG, Miller JJ, Schaafsma G. 2004. *Dietary Fiber Bioactive Carbohydrates for Food and Feed.* Ed. Wageningen Academic Publishers. Netherlands. p 21-24.

- Vázquez CA, Jiménez AI. 1999. Servicio de aparato digestivo. Hospital Universitario de la Princesa. Fibra dietética. Prescripción de fármacos. vol. 5. no. 4.
- Velázquez Uribe G. 2006. Fundamentos de alimentación saludable. Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Antioquía. p 92.
- Vijaya C, Ramanathan M, Suresh B. 2009. Lipid lowering activity of ethanolic extract of leaves of *Aegle marmelos* (Linn.) in hyperlipidaemic models of Wistar albino rats. Indian J. of Experimental Biology. Vol. 47. p 182-185.
- Voet D, Voet GJ. 2006. Bioquímica. 3ra ed. Ed. Médica Panamericana. Buenos Aires, Argentina. p 454, 455.
- Waggle DH, Deyoe CW, Smith FW. 1995. En: El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana. Colección FAO: Alimentación y Nutrición, N° 27. Roma, Italia. p 69.
- Waniska RD, Poe JH, Bandyopadhyay R. 2004. In: Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. Phytochemistry 65:1199-1221.
- Waniska RD, Poe JH, Bandyopadhyay R. 2005. In: Decorticating sorghum to concentrate healthy phytochemicals. J Agric Food Chem. 53(16):6230-6234.
- Waterman PG, Mole S. 1994. Analysis of Plant Metabolites. Oxford: Alden Press Limited. p 1 16, 66 103.
- Watson AD, Berliner JA, Hama SY, La Du BN, Faull KF, Fogelman AM. 2004. En: Función antioxidante de las lipoproteínas de alta densidad: un nuevo paradigma en la arteriosclerosis. Rev Esp Cardiol. 57(6):557-569.
- Watson AD, Subbanagounder G, Welsbie DS, Faull KF, Navab M, Jung ME. 2004. En: Función antioxidante de las lipoproteínas de alta densidad: un nuevo paradigma en la arteriosclerosis. Rev Esp Cardiol. 57(6):557-569.
- Wharton PS, Nicholson RL. 2006. In: Sorghum and millet phenols and antioxidants. J Cereal Science. 44:236-251.
- Whitaker ME, Tanner M. 1995. En: El Sorgo y el Mijo en la Nutrición Humana. Colección FAO: Alimentación y nutrición. No 27. p 75.

- Williams Melvin H. 2002. *Nutrición para la Salud, la Condición Física y el Deporte*. 5ta ed. Ed. Paidotribo. Barcelona España. Cap. 4 p 128.
- Wong JH, Lau T, Cai N, Singh J, Pedersen JF, Vensel WH, Hurkman WJ, Wilson JD, Lemaux PG, Buchanan BB. 2009. Digestibility of protein and starch from sorghum (*Sorghum bicolor*) is linked to biochemical and structural features of grain endosperm. *J Cereal Science*. 49(7):73-82.
- [WHO] World Health Organization. 2007. In: Whole grain intake and cardiovascular disease: A meta-analysis. *Nutr Metab Cardiovasc Dis*. [Internet]. 2007 [cited 2012 August 20]. Available from: doi:10.1016/j.numecd.2006.12.008
- Wu X, Gu L, Holden J, Haytowitz DB, Gebhardt SE, Beecher G, Prior RL. 2004. Development of a database for total antioxidant capacity in foods: a preliminary study. *J Food Composition and Analysis*. 17:407-422.
- Wu X, Prior RL. 2006. In: Sorghum and millet phenols and antioxidants. *J Cereal Science*. 44:236-251.