



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICO BIOLÓGICAS

MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN ALIMENTOS

**Actividad Antioxidante e Inhibición de α -Glucosidasa
de Hidrolizados de Fracciones Proteicas de Maíz
(*Zea mays* L.) con Alto Contenido en Aceite**

TESIS

Que presenta

IBQ. MASIEL RIVERA ATONDO

Para obtener el Grado de
MAESTRA EN CIENCIA
Y
TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Directores de Tesis

DR. JOSÉ ÁNGEL LÓPEZ VALENZUELA
DRA. KAREN VIRGINIA PINEDA HIDALGO

Culiacán, Sinaloa, México

Octubre 2023



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

UAS-Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial
Compartir Igual, 4.0 Internacional



El presente trabajo se realizó en los Laboratorios de Bioquímica y Biología Molecular de Plantas y Laboratorio de Proteómica y Metabolómica, Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, bajo la dirección del Dr. José Ángel López Valenzuela y la Dra. Karen Virginia Pineda Hidalgo. Contó con la asesoría de la Dra. Jeanett Chávez Ontiveros, la Dra. Nancy Yareli Salazar Salas y la Dra. Gabriela López Angulo. Contó con financiamiento del Programa de Fomento y Apoyo a Proyectos de Investigación (PROFAPI 2022/A7_007) de la Universidad Autónoma de Sinaloa. La IBQ. Masiel Rivera Atondo recibió beca de estudios del Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT).

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Autónoma de Sinaloa** y a la **Facultad de Ciencias Químico Biológicas** por brindarme la oportunidad para mi formación a través del **Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos** me permitió culminar mi formación como **Maestra en Ciencia y Tecnología de Alimentos**.

Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por la beca otorgada para la realización de este proyecto.

A mi director de tesis, el **Dr. José Ángel López Valenzuela** por permitirme trabajar a su lado y brindarme su apoyo incondicional para la realización de este proyecto, gracias por su ayuda y sobretodo su paciencia.

Un agradecimiento muy especial para la **Dra. Karen Virginia Pineda Hidalgo**, quien además de ser mi directora, se volvió mi amiga y alguien que sinceramente me marcó para siempre y se queda en mi corazón. Muchas gracias por guiarme como profesora y mentora, así como por permitirme ampliarme y fortalecer mis conocimientos en la rama de la investigación. Gracias por confiar en mí para poder seguir adelante, tanto dentro como fuera del laboratorio, siempre significará mucho para mí. La quiero mucho.

Quiero agradecer a la **Dra. Jeanett Chávez Ontiveros** por estar pendiente durante todo mi proceso en el posgrado y darme consejos, no solo del laboratorio, si no de vida. Gracias.

Un agradecimiento a la **Dra. Gabriela López Angulo**, por el apoyo y la paciencia en la realización de los experimentos y siempre estar pendiente del proyecto.

A la **Dra. Nancy Yareli Salazar Salas** por el apoyo, la confianza y las buenas charlas desde que entre al laboratorio.

Al **Dr. Francisco Delgado Vargas** por permitirme usar sus instalaciones y el apoyo que siempre me brindo a lo largo del posgrado.

A mis compañeros de laboratorio: **David**, que siempre me apoyaste en todo lo que ocupaba, me enseñaste tips importantes y siempre te aseguraste de que estuviera

bien. Eres un gran amigo. **Chely**, gracias por ayudarme en lo que necesitaba, me gustó cuando trabajábamos juntas. **Gamaliel**, eres un gran amigo y una muy fina persona, gracias por las buenas pláticas. **Alicia** gracias por la paciencia y por enseñarme las misma cosas una y otra vez. **Edwin** gracias por los miércoles de pan. **Milton, Adán, Manuel y Victor** gracias por ayudarme dentro y fuera del laboratorio, vivimos buenos momentos juntos.

Quiero agradecer a **Jeanette**, que nos volvimos buenas amigas desde las primeras clases. Gracias por permitirme conocerte mejor, nos enseñarnos mutuamente cosas importantes y vivimos muchos momentos divertidos.

Especialmente agradezco a quienes siempre me han apoyado en cada una de mis metas, **a mis papás: Germán y Alma**, que son lo más importante para mí y espero que siempre se sientan orgullosos.

Agradezco a mi familia: Mis hermanas **Erika, Karina**, y a mi hermano **Yusseff**, así como **mis sobrinas, mis cuñados y mi cuñada** por siempre estar presentes y apoyarme en cada una de mis etapas de estudio.

Y finalmente agradezco a **Bladimir** por siempre estar conmigo, gracias por todo tu apoyo, cariño y comprensión a lo largo de mi proceso, así como siempre alentarme a ser mejor persona.

ÍNDICE GENERAL

	Página
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE CUADROS	v
I RESUMEN	1
ABSTRACT	3
II INTRODUCCIÓN	5
III REVISIÓN DE LITERATURA	7
A GENERALIDADES DEL MAÍZ	7
1 Origen y taxonomía	7
2 Características botánicas	7
3 Estadísticas de producción	10
4 Estructura del grano y composición	13
a Proteínas	13
b Lípidos	19
B MAÍZ CON ALTO CONTENIDO DE ACEITE	20
1 Generalidades	20
2 Aplicaciones	22
C PÉPTIDOS BIOACTIVOS	23
1 Introducción	23
2 Hidrólisis enzimática	24
3 Actividades biológicas de péptidos de maíz	28
a Actividad antihipertensiva	31

b Actividad antioxidante	32
c Actividad hipoglucémica	34
IV JUSTIFICACIÓN	41
V HIPÓTESIS	42
VI OBJETIVOS	43
A OBJETIVO GENERAL	43
B OBJETIVOS ESPECÍFICOS	43
VII MATERIALES Y MÉTODOS	44
A MATERIALES	44
B MÉTODOS	44
1 Extracción y cuantificación de las fracciones de proteínas	44
2 Obtención de hidrolizados proteínicos	46
3 Evaluación de la actividad antioxidante	47
a DPPH	47
b ABTS	47
c ORAC	48
4 Evaluación de la actividad inhibitoria de α -glucosidasa	49
5 Análisis estadístico	49
VIII RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
A CONTENIDO DE ALBÚMINAS, GLOBULINAS Y PROLAMINAS EN MAÍCES ACA	50
B GRADO DE HIDRÓLISIS Y RENDIMIENTO DE HIDROLIZADOS DE FRACCIONES PROTEICAS EN MAÍCES ACA	52
1 Grado de hidrólisis	52

2 Rendimientos de hidrolizados de las fracciones proteicas	57
C ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE HIDROLIZADOS DE ALBÚMINAS, GLOBULINAS Y PROLAMINAS DE MAÍCES ACA	57
1 DPPH	59
2 ABTS	61
3 ORAC	63
D CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE OBSERVADA EN LOS HIDROLIZADOS DE MAÍCES ACA	65
E INHIBICIÓN DE α -GLUCOSIDASA DE HIDROLIZADOS DE ALBÚMINAS, GLOBULINAS Y PROLAMINAS EN MAÍCES ACA	69
F RELACIÓN ENTRE LAS CARACTERISTICAS EVALUADAS EN LOS MAÍCES ACA	73
IX CONCLUSIONES	76
X BIBLIOGRAFÍA	77
ABREVIATURAS	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
1	Planta de maíz	9
2	Estructura del grano de maíz	14
3	Esquema de la acción de enzimas proteolíticas sobre un complejo proteico	26
4	Localización y acción de las enzimas α -amilasa y α -glucosidasa	36
5	Esquema de acción de la enzima α -glucosidasa y modos básicos de acción de sus inhibidores	38
6	Contenido de albúminas, globulinas y prolaminas en los maíces ACA y un híbrido comercial	51
7	Grado de hidrólisis de albúminas de maíces ACA tratadas con alcalasa	53
8	Grado de hidrólisis de globulinas de maíces ACA tratadas con alcalasa	54
9	Grado de hidrólisis de prolaminas de maíces ACA tratadas con alcalasa	56
10	Análisis de componentes principales de maíces ACA y un híbrido comercial	74

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Descripción	Página
1	Taxonomía del maíz	8
2	Producción de maíz a nivel mundial (2021)	11
3	Producción de maíz en México (2021)	12
4	Composición química del grano de maíz y sus principales estructuras	15
5	Composición de aminoácidos de albúminas, globulinas, prolaminas y glutelinas en el endospermo de maíz	17
6	Péptidos bioactivos y actividades asociadas en maíz	29
7	Rendimiento de hidrolizados de albúminas, globulinas y prolaminas de maíces ACA y un maíz híbrido comercial	58
8	Actividad antioxidante de proteína e hidrolizados de albúminas, globulinas y prolaminas por método de DPPH	60
9	Actividad antioxidante de proteína e hidrolizados de albúminas, globulinas y prolaminas por método de ABTS	62
10	Actividad antioxidante de proteína e hidrolizados de albúminas, globulinas y prolaminas por método de ORAC	64
11	Actividad inhibitoria de α -glucosidasa de hidrolizados de albúminas, globulinas y prolaminas	70

I. RESUMEN

El maíz constituye la base de la alimentación en México por lo que tiene una gran importancia económica y social. Por ello, el desarrollo de maíces especializados que sean competitivos y puedan estar al alcance de los agricultores es muy relevante. El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) desarrolló maíces con alto contenido de aceite (ACA) (6-8%), los cuales también poseen un mayor contenido de proteína como consecuencia del aumento en el tamaño del germen. Las proteínas de maíz pueden generar mediante hidrólisis enzimática péptidos bioactivos que ejercen una amplia variedad de efectos biológicos importantes actuando como antioxidantes, anticancerígenos, antihipertensivos, hipoglucemiantes, antimicrobianos, entre otros. Sin embargo, no existe información sobre las actividades biológicas de péptidos de maíces ACA. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la actividad antioxidante (AAox) e inhibitoria de α -glucosidasa *in vitro* de hidrolizados de albúminas (Alb), globulinas (Glb) y prolaminas (Pro) de maíces ACA. Se utilizaron cuatro híbridos ACA, dos blancos (PBN85 x PBB183, PNB11 x PBN84) y dos amarillos (PAN157 x PAB218, CML451/CML486 x PAN133), así como un híbrido comercial como referencia. Se extrajeron fracciones proteicas secuencialmente de acuerdo con su solubilidad: Alb (Agua), Glb (NaCl 0.5 M, pH 7) y Pro (EtOH 70%). Se hidrolizaron con alcalasa y se obtuvieron las fracciones < 10 kDa. Se determinó el grado de hidrólisis (GH), la AAox por ABTS, DPPH y ORAC, así como la actividad inhibitoria de α -glucosidasa *in vitro*. La fracción Alb presentó los mayores valores de GH (30.27-24.35%), seguido de Glb (27.09–14.56%) y Pro (11.14–8.38%). En general la AAox de los hidrolizados de maíces ACA fue significativamente mayor que la del híbrido

comercial. Los hidrolizados de albúminas mostraron la mayor AAox por DPPH (5 mg/mL) observando la mayor inhibición del radical en PBN11 x PBN84 (51.47%) y CML451/CML486 x PAN133 (49.19%), mientras que los hidrolizados de prolaminas y globulinas (1 mg/mL) mostraron la mayor AAox por ABTS (68.38% y 57.34%, respectivamente) y ORAC (714.28 y 338.35 $\mu\text{mol ET/g H bs}$, respectivamente); los maíces ACA sobresalientes fueron PBN11 x PBN84 (Pro) y PAN157 x PAB218 (Glb). La actividad inhibitoria de α -glucosidasa fue mayor en Alb (34.09-68.15%), seguido de Glb (20.33-58.59%) y Pro (29.61-58.71%), destacando el maíz ACA CML451/CML486 x PAN133, cuyos hidrolizados presentaron los valores más altos en las tres fracciones proteicas. Los resultados demuestran que los maíces ACA son una buena fuente de péptidos con actividad antioxidante e inhibitoria de α -glucosidasa y algunos de ellos poseen mejores propiedades nutraceuticas que el híbrido comercial, por lo que representan una buena alternativa para ser incluidos en la dieta o para ser utilizados como parte de tratamientos no farmacológicos contra enfermedades relacionadas con el estrés oxidativo y la diabetes.

ABSTRACT

Corn is a staple food in Mexico and has a great economic and social relevance. Therefore, the development of specialized corn genotypes that are competitive and within the reach of farmers is very relevant. The National Institute of Forestry, Agricultural and Livestock Research (INIFAP) developed high oil corn (HOC) (6-8%), which also have a higher protein content because of an increase in germ size. Corn proteins can generate bioactive peptides through enzymatic hydrolysis, which exert a wide variety of important biological effects, acting as antioxidants, anticancer, antihypertensive, hypoglycemic, antimicrobial, among others. However, there is no information about the biological activities of peptides from HOC. The objective of this work was to evaluate the antioxidant activity (AoxA) and α -glucosidase inhibitory activity *in vitro* of albumin (Alb), globulin (Glb), and prolamin (Pro) hydrolysates from HOC. Four HOC hybrids were used, two white (PBN85 x PBB183, PNB11 x PBN84) and two yellow (PAN157 x PAB218, CML451/CML486 x PAN133), and a commercial hybrid as reference. The protein fractions were extracted sequentially based on their solubility: Alb (Water), Glb (0.5 M NaCl, pH 7), and Pro (EtOH 70%); they were hydrolyzed with alcalase and fractions <10 kDa were obtained. The degree of hydrolysis (% GH), AoxA by ABTS, DPPH and ORAC assays, and the inhibitory activity of α -glucosidase were determined. Alb showed the highest %GH (30.27-24.35%), followed by Glb (27.09-14.56%) and Pro (11.14-8.38%). In general, the AoxA of the HOC hydrolysates was significantly higher than that of the commercial hybrid. Albumin hydrolysates showed the highest AoxA by DPPH (5 mg/mL) with the highest radical inhibition observed in PBN11 x PBN84 (51.47%) and CML451/CML486 x PAN133

(49.19%), while prolamins and globulins hydrolyzates (1 mg/mL) showed the highest AAox by ABTS (68.38% and 57.34%, respectively) and ORAC (714.28 and 338.35 $\mu\text{mol ET/g H bs}$, respectively), highlighting PBN11 x PBN84 (Pro) and PAN157 x PAB218(Glb). The inhibitory activity of α -glucosidase was higher in Alb (34.09-68.15%), followed by Glb (20.33-58.59%), and Pro (29.61-58.71%), highlighting the CML451/CML486 x PAN133 genotype, whose hydrolysates showed the highest values in the three protein fractions evaluated. The results show that the HOC hydrolysates have high antioxidant and hypoglycemic activity, and some of them have better nutraceutical properties than the commercial hybrid, therefore, they represent a good alternative to be included in the diet or to be used as part of non-pharmacological treatments against diseases related to oxidative stress and diabetes.

II. INTRODUCCIÓN

El maíz es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial ya que se produce en la mayoría de los países y tiene una amplia variedad de usos. México ocupa el octavo lugar de producción de maíz a nivel mundial (FAOSTAT 2023) y a nivel nacional el estado de Sinaloa es el principal productor de este cereal (SIACON 2023). El maíz es una buena fuente de nutrimentos y compuestos bioactivos con beneficios para la salud, siendo rico en carbohidratos (almidón), proteínas y aceite, además de contener varios fitoquímicos importantes como vitamina E y fitoesteroles, entre otros (Austrias 2011; Arendt y Zannini 2013).

Las proteínas del maíz tradicionalmente se clasifican en cuatro fracciones según su solubilidad: albúminas (solubles en agua), globulinas (solubles en soluciones salinas), prolaminas o zeínas (solubles en alcohol) y glutelinas (solubles en diluyentes alcalinos). Del total de la proteína del grano, alrededor del 52% son prolaminas y se localizan principalmente en el endospermo, mientras que el resto lo constituyen las albúminas y globulinas (22%), las cuales se concentran en el germen, y las glutelinas (25%) que se encuentran tanto en el germen como en el endospermo (Wilson 1987).

El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) ha desarrollado maíces especializados con alto contenido de aceite (ACA) los cuales se caracterizan por tener más del 6% de aceite y un alto contenido de ácidos grasos esenciales poliinsaturados, además de un aumento en el contenido de proteínas y aminoácidos, características que en conjunto pueden contribuir en la disminución o la

reversión del desarrollo de enfermedades crónicas degenerativas (Dudley y Lambert 1992; Lambert 2001; Preciado-Ortiz y col 2013).

Los granos de maíz ACA se han tratado de introducir en la producción comercial de México, pero a la fecha sus beneficios no han sido aprovechados (Preciado-Ortiz y col 2013), por lo que es importante estudiar las características nutracéuticas de estos materiales para darles valor agregado y motivar su uso.

La hidrólisis enzimática de las proteínas genera cadenas más cortas de aminoácidos llamados péptidos, lo cual permite su absorción del tracto digestivo al torrente sanguíneo (Chakrabarti y col 2018). Los biopéptidos o péptidos bioactivos se han relacionado con actividades biológicas importantes. Actualmente se cuenta con mucha información sobre estudios realizados en péptidos bioactivos obtenidos de diferentes genotipos de maíz, los cuales han reportado actividades tales como inducción de apoptosis de células cancerígenas, actividades antioxidante, antihipertensiva, anticolesterolémica e hipoglucemiante, entre otras, brindando beneficios para la salud humana y teniendo el potencial de reducir el riesgo de enfermedades crónicas importantes (Nasri 2017). Sin embargo, en maíz ACA no se han encontrado reportes de péptidos bioactivos de hidrolizados de las diferentes proteínas de almacenamiento. Por ello, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la actividad antioxidante (AAox) e inhibitoria de α -glucosidasa *in vitro* de hidrolizados de fracciones de proteínas (albúminas, globulinas y prolaminas) de maíces ACA. Esto permitió comprobar la actividad biológica que pueden brindar los péptidos provenientes de maíces ACA y conocer el potencial uso de estos materiales para mejorar la salud.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

A GENERALIDADES DEL MAÍZ

1 Origen y taxonomía

El maíz (*Zea mays* L.) es un cultivo de unos 7,000 años de antigüedad cuyo centro de domesticación fue Mesoamérica que incluye parte de México y América central, siendo uno de los cereales más importante para consumo humano y animal (Acosta 2009). Su domesticación lo convirtió en una planta apta para proporcionar a los grupos humanos cantidades de grano suficientes para alimentarse adecuadamente. Hoy en día continúa siendo el principal alimento de los mexicanos ya que es procesado por medios industriales para diversos fines (López-Mazón y col 2012).

Zea mays pertenece a la familia de las Poáceas (Gramíneas), tribu Maydeas, comprendiendo más de 600 géneros (**Cuadro 1**). Son comúnmente llamados teosinte y las especies del género *Tripsacum* conocidas como arrocillo o maicillo son formas salvajes parientes de *Zea mays*. Son clasificadas como del Nuevo Mundo, porque su centro de origen está en América (Acosta 2009; Kato-Yamakake y col 2009). *Zea mays* es la única especie cultivada de las Maydeas y de gran importancia económica. Además, es conocida con varios nombres comunes como choclo, jojote siendo maize, el más usado dentro de los países de habla inglesa excepto en los Estados Unidos de América y Canadá, donde se le denomina corn (Paliwal 2001).

2 Características botánicas

El maíz (*Zea mays* L.) es una planta monoica de flores unisexuales (masculinas y femeninas) bien diferenciadas en la misma planta (**Figura 1**). La inflorescencia

Cuadro 1. Taxonomía del maíz

Categoría

Reino	Plantae
Subdivisión	Magnoliophyta (angiosperma)
Clase	Liliopsida (monocotiledonia)
Subclase	Commelinidae
Orden	Poales
Familia	Poaceae
Tribu	Andropogoneae
Subtribu	Tripsacinae
Género	<i>Zea</i>
Especie	<i>Zea mays</i>

Linné y Lars (1753)

A



B



C



Figura 1. Planta de maíz. (A) Parte de la planta con mazorca, hojas, espiga y tallo.

(B) Inflorescencia masculina (C) Inflorescencia femenina (EncicloVida 2015).

masculina es terminal, conocida como panícula (espiga) y consta de un eje central (raquis) y ramas laterales. Cada florecilla de la panícula tiene tres estambres donde se desarrollan los granos de polen. Las inflorescencias femeninas (mazorcas) se encuentran en las yemas axilares de las hojas, son espigas de forma cilíndrica que consisten en un raquis central u olote donde se insertan las espiguillas por pares, cada espiguilla con dos flores pistiladas una fértil y una abortiva, las cuales se arreglan en hileras paralelas. Esta inflorescencia puede formar alrededor de 400 a 1,000 granos arreglados en 8 a 24 hileras por mazorca en promedio (Kato-Yamakake y col 2009). En la mazorca cada grano es un fruto independiente llamado cariósipide insertado en el tallo cilíndrico u olote. Las principales estructuras que componen al grano son pericarpio, endospermo y embrión (germen), los cuales le confieren propiedades físicas y químicas que han sido importantes en su selección como alimento (Kato-Yamakake y col 2009).

3 Estadísticas de producción

En la producción mundial de cereales en el año 2021, el maíz ocupa el tercer lugar después del arroz y el trigo obteniéndose una producción de maíz superior a 1,482 millones de toneladas (**Cuadro 2**) (FAOSTAT 2023). Estados Unidos de América y China fueron los principales países productores y México ocupó el octavo lugar con una producción total de 27.5 millones de ton (FAOSTAT 2023). En ese mismo año a nivel nacional, Sinaloa fue el principal estado productor de maíz contribuyendo con un 20% del total, seguido de Jalisco y Estado de México (**Cuadro 3**) (SIACON 2023).

Cuadro 2. Producción de maíz a nivel mundial (2021)

País	Ton
Estados Unidos de América	383,943,000
China	272,762,124
China, Continental	272,552,000
Brasil	88,461,943
Argentina	60,525,805
Ucrania	42,109,850
India	31,650,000
México	27,503,478
Indonesia	20,010,000
Sudáfrica	16,870,705
Otros	266,608,354
Total	1,482, 997, 259

FAOSTAT (2023)

Cuadro 3. Producción de maíz en México (2021)

Estado	Ton
Sinaloa	5,535,561
Jalisco	3,945,528
México	1,936,184
Guanajuato	1,929,919
Michoacán	1,907,403
Chihuahua	1,501,316
Guerrero	1,460,629
Chiapas	1,288,652
Veracruz	1,285,497
Puebla	1,151,896
Otros	5,560,893
Total	27,503,478

SIACON (2023)

4 Estructura del grano y composición

El grano de maíz está constituido por cuatro estructuras principales: pericarpio o cáscara, germen o embrión, endospermo y pedicelo (**Figura 2**), las cuales varían en su composición química (**Cuadro 4**). El pericarpio es la piel externa o cubierta del grano, que sirve como elemento protector y posee un elevado contenido de fibra cruda (~ 87%), que a su vez está formada por hemicelulosa (67%), celulosa (23%) y lignina (0.1%). Por su parte, el germen representa del 10 al 11 % del grano, teniendo un alto contenido de proteína (~20%), además de contener un elevado contenido de grasa (33%) y un nivel relativamente elevado de minerales (FAO 1993; Shewry y Halford 2002).

El endospermo, es la principal reserva energética del grano de maíz y ocupa hasta el 80% del peso de este. Está compuesto principalmente por almidón (amilosa y amilopectina), el cual se encuentran incrustado en una matriz proteica; la porción de amilosa y amilopectina, así como su tamaño, dependen del lugar en donde se ubiquen, ya sea en la porción vítrea o harinosa. El endospermo harinoso contiene gránulos de almidón sueltos que rodean la parte central del grano, mientras que el endospermo vitreo tiene gránulos de almidón más pequeños y compactos hacia la periferia (FAO 1993; Rowe y col 1999). Por último, el pedicelo juega un papel muy importante en la germinación del grano y está compuesto de aceites y minerales, además de servir como protección del germen (FAO 1993).

a Proteínas

Las proteínas del maíz tradicionalmente se clasifican en cuatro fracciones según

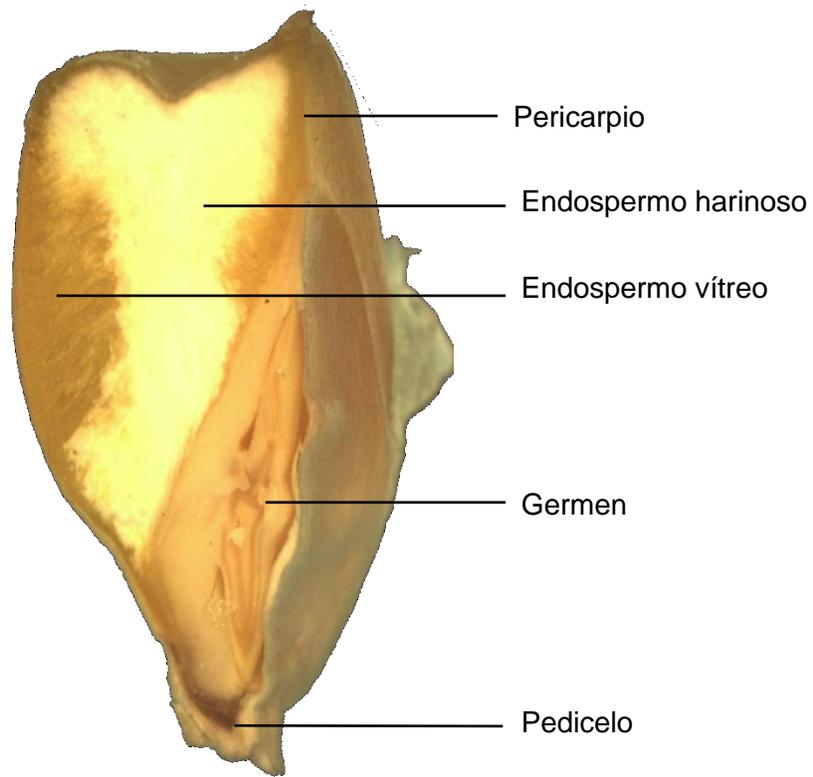


Figura 2. Estructura del grano de maíz. Cortesía de Joao T. Leiva (Departamento de Ciencia de Plantas de la Universidad de Arizona).

Cuadro 4. Composición química del grano de maíz y sus principales estructuras

Composición^a	Grano	Endospermo	Germen	Pericarpio
Almidón	72.5	86.4	8.2	7.3
Proteína	10.3	9.4	34.5	3.7
Lípidos	4.8	0.8	18.8	1.0
Azúcares	2.0	0.6	10.8	0.3
Cenizas	1.4	0.3	10.1	0.8

^a Porcentaje (%) en base seca. FAO (1993); Paliwal (2001).

su solubilidad: albúminas (solubles en agua), globulinas (solubles en soluciones salinas), prolaminas o zeínas (solubles en alcohol) y glutelinas (solubles en diluyentes alcalinos), donde las últimas dos representan gran parte de la proteína insoluble del grano de maíz (Shewry y Halford 2002). Del total de la proteína del grano, alrededor del 52% son prolaminas y se localizan principalmente en el endospermo, el resto lo constituyen las albúminas y globulinas (22%), las cuales se concentran en el germen, y las glutelinas (25%) que se encuentran tanto en el germen como en el endospermo (Wilson 1987). Las albúminas y las globulinas representan más del 60% de la proteína germinal total, además las globulinas también se encuentran en la capa exterior de aleurona del endospermo; ambas tienen un mejor balance de aminoácidos que las prolaminas o zeínas que son las más abundantes en el endospermo de maíz (Wilson 1987; Espinosa-Pardo y col 2020).

Las albúminas contienen altos contenidos de ácido aspártico, treonina, glicina y alanina, pero tienen un bajo contenido de cisteína, prolina, ácido glutámico y fenilalanina (**Cuadro 5**) en comparación con las otras fracciones. Así mismo, contienen aminoácidos como la lisina y el triptófano que contribuyen al crecimiento adecuado, la estabilidad mental y el bienestar general de una persona. Por su parte, las globulinas, se han considerado durante mucho tiempo como proteínas de almacenamiento mientras que, las albúminas se consideran proteínas metabólicas (Kumar-Vasal 2001; Díaz-Gómez y col 2017).

En maíz, las globulinas se clasifican en globulina-1, la proteína de almacenamiento más abundante en el embrión, y globulina-2; estas contienen altas cantidades de

Cuadro 5. Composición de aminoácidos de albúminas, globulinas, prolaminas y glutelinas en el endospermo de maíz

Aminoácidos ¹		Albúminas	Globulinas	Prolaminas	Glutelinas
Ác. Aspártico	Asp	8.2	8.6	3.6	7.3
Ác. Glutámico	Glu	12.3	11.6	19.2	14.1
Alanina	Ala	11.0	10.4	12.1	8.6
Arginina	Arg	5.3	5.5	1.6	4.2
Cisteína	Cys	0.2	1.2	1.7	1.4
Fenilalanina	Phe	3.3	3.6	3.5	3.3
Glicina	Gly	10.1	11.3	5.2	8.5
Histidina	His	1.9	2.0	1.6	3.5
Isoleucina	Ile	4.4	4.1	2.7	4.2
Leucina	Leu	9.3	8.1	14.6	9.1
Lisina	Lys	5.4	5.0	0.1	4.7
Metionina	Met	1.3	1.2	5.6	1.7
Prolina	Pro	6.9	7.4	12.6	9.6
Serina	Ser	5.6	5.6	5.0	5.2
Tirosina	Tyr	2.5	2.6	4.2	2.8
Treonina	Thr	5.0	4.9	2.9	4.3
Valina	Val	7.1	7.0	3.8	7.4

¹g de Aa/ 100 g de proteína.

(Sodek y Wilson 1971)

arginina, glutamina, ácido glutámico, asparagina y ácido aspártico (Kriz 1989; Mouzo y col 2018).

La composición de aminoácidos de las globulinas se considera de gran importancia, ya que son proteínas de almacenamiento que suministran nitrógeno para la germinación, pero contienen una cantidad baja de aminoácidos con azufre, lo que puede ser un factor limitante en su valor nutricional (Youle y Anthony 1981; Mouzo y col 2018).

En el endospermo las proteínas representan alrededor del 10% del peso del grano, donde las zeínas son las más importantes debido a que son las más abundantes como ya se mencionó anteriormente, siendo su principal y única función la de almacenar nitrógeno para la germinación del embrión. Estas proteínas son nutricionalmente pobres, debido principalmente a que son deficientes en los aminoácidos esenciales, lisina y triptófano (**Cuadro 5**). Las proteínas del maíz también son limitantes en treonina y metionina. Las prolaminas se agregan en forma de cuerpos proteínicos y se clasifican en cuatro grupos: α -, β -, γ - y δ -zeínas, cada una con diferencias de pesomolecular, secuencia de aminoácidos y solubilidad (Wilson 1987; Shewry y Halford 2002).

La α -zeína (19 y 22 kDa) es la prolamina más abundante del maíz y representa el 80-85% del total de las zeínas, β -(14 kDa) y δ -zeínas (10 kDa) son fracciones minoritarias, ambas son ricas en aminoácido azufrados y comprenden el 10% de las zeínas. En cuanto a la γ -zeína (16 y 27 kDa) es rica en cisteína y se subdivide en subtipos de acuerdo a su peso molecular y secuencia de aminoácidos, contribuyendo

de 10 a 15% del total de las zeínas (Shewry y Halford 2002; Huang y col 2004).

Las β y δ -zeínas son ricas en metionina, cisteína y forman polímeros; estos residuos se agrupan en una región cercana al extremo C-terminal. Por otra parte, las α -zeínas contienen solo uno o dos residuos de cisteína por molécula y están presentes en el grano como monómeros u oligómeros. Debido a que las zeínas son deficientes en lisina y triptófano, el endospermo posee pequeñas cantidades de dichos aminoácidos esenciales (Shewry y Halford 2002; Arendt y Zannini 2013). Por otro lado, la fracción de glutelina tiene pesos moleculares de 10, 15, 18 y 27 kDa y están presentes en los cuerpos proteínicos junto con las zeínas, por lo que su función y composición de aminoácidos es similar a la de las zeínas. Sin embargo, a diferencia de las zeínas, el contenido de lisina en las glutelinas es de 2 a 3 g/100 g de proteína o incluso mayor (Kumar-Vasal 2001; Díaz-Gómez y col 2017).

De manera general las albúminas, las globulinas y las glutelinas poseen un contenido elevado de lisina en comparación con las zeínas, mientras que las zeínas poseen niveles más altos de glutamina/ácido glutámico (**Cuadro 5**). Cabe señalar que, cuatro aminoácidos (glutamina, prolina, leucina y alanina) representan casi el 65% del total de aminoácidos en la fracción zeínas (Sodek y Wilson 1971; Larkins 2019).

b Lípidos

El contenido de lípidos en el grano de maíz varía entre 3 y 4.5% y se encuentran principalmente en el germen (84%) y endospermo (16%), donde el primero se caracteriza por tener grandes cantidades de energía en forma de aceite, teniendo como principal función nutrir a la planta cuando comienza el período de crecimiento

(FAO 1993; Serna-Saldívar y col 2013). El contenido de aceite puede aumentar según el tamaño del germen.

El triacilglicerol es la principal forma de almacenamiento de los lípidos del grano, aunque la composición lipídica también puede incluir fosfolípidos (1.5%), esteroides (1%), ceras (<1%), alcoholes (<1%) y micronutrientes hidrofóbicos (<1%) (Taylor-Nuss y Tanumihardjo 2010). Los lípidos de maíz están constituidos principalmente por ácidos grasos libres, en los que predominan el ácido linoleico (C18:2) (62%) que es un ácido graso poliinsaturado (AGP) y el ácido oleico (C18:1) (24%) que es un ácido graso monoinsaturado (AGM); en menor proporción se encuentran los ácidos grasos poliinsaturados, como el ácido linolénico (C18:3) (0.7-0.8%) (AGP) y los ácidos grasos saturados (AGS) palmítico (C16:0) (11-11.5%) y esteárico (C18:0) (2-2.2%) (FAO 1993; Cuevas-Mejía 2014; Delucchi y col 2019).

B MAÍZ CON ALTO CONTENIDO DE ACEITE

1 Generalidades

Debido a la importancia económica del cultivo de maíz, se han realizado trabajos de mejoramiento genético que han permitido desarrollar maíces especializados para satisfacer necesidades específicas de consumo humano y animal o para aplicaciones industriales. Entre los maíces especializados se encuentran los que presentan alto contenido de aceite (ACA) y que fueron primero desarrollados en Estados Unidos de América durante el siglo pasado mediante un esquema de selección recurrente. Actualmente, en ese país la tecnología existente para maíces ACA consiste básicamente en desarrollar híbridos denominados "Top cross" o mestizo (Thomison y

col 2003). En México, esta característica no se había aprovechado debido a que no se contaba con variedades comerciales de alto contenido de aceite (Estrada y col 2008).

Se catalogan como maíces ACA aquellos con más de 6% de aceite y con alto contenido de ácidos grasos esenciales poliinsaturados, considerados deseables en la dieta humana (Lambert 2001). En 1896, los científicos de la Universidad de Illinois iniciaron el primer experimento planificado para mejorar la calidad del grano de cereales, llevando a cabo un experimento de selección a largo plazo de aceite y proteína en maíz. Se utilizó el sistema de selección en surco por mazorca, seleccionando tanto para alto como para bajo contenido de aceite, observando que en la línea de alto contenido de aceite este componente aumentó de 4.7 a 9.9% durante los primeros 29 años de selección (Winter 1929). Sin embargo, fue hasta 1949 que el Illinois High Oil se consideró la principal fuente de germoplasma para los primeros híbridos de maíz con alto contenido de aceite (Moose y col 2004).

Desde el punto de vista nutricional del maíz son importantes el contenido de ácidos grasos y la calidad proteínica del grano (Dudley y col 2007). Li (1997) encontró una correlación positiva entre el contenido de proteína cruda y aceite, pero una relación negativa entre estas dos características con respecto al contenido de carbohidratos. Esto sugiere que los maíces con altos niveles de aceite y menor proporción de carbohidratos tienen mayor energía, debido a que el contenido calórico del aceite es aproximadamente 2.5 veces mayor que el de carbohidratos.

El aceite se localiza en el germen, por lo que la proporción de este componente depende en su mayoría del tamaño del embrión, lo cual a su vez es determinado

genéticamente (Dudley y col 2007). El aumento en el tamaño del germen de maíces ACA da como resultado un mayor contenido de aceite y mejora la calidad de la proteína del grano (Lambert y col 1998), debido a que está constituido principalmente por albúminas y globulinas (Inglett y Blessin 1979); además destaca un aumento en el contenido de algunos aminoácidos como treonina, metionina y lisina, siendo este último uno de los aminoácidos limitantes en el maíz y debido a que el tamaño del escutelo es más grande en comparación con el maíz normal, puede aumentar de un 0.28% (maíz normal) a 0.32% (maíz ACA) el contenido de lisina en peso seco (Lambert 2001). Aunado a eso, se estima que conforme incrementa el contenido de aceite también aumentan compuestos con actividad nutracéutica como carotenoides, xantofilas, además de compuestos fenólicos y vitamina E, siendo una buena fuente de antioxidantes, así como fitoesteroles que reducen el colesterol en la sangre al inhibir su absorción en los intestinos con ayuda del almidón resistente (Thomison y col 2003; Singh y col 2014).

En un estudio realizado por Preciado-Ortíz y col (2018) en dos híbridos de maíz ACA (maíz blanco y maíz amarillo) se encontró un incremento en el contenido de aceite de 19.6% (maíz blanco) y 58.8% (maíz amarillo) con respecto al maíz normal, localizándose la mayor proporción en el embrión y en el endospermo vítreo. Además, se presentó un mayor contenido de ácidos grasos insaturados (oleico + linoleico) en los maíces ACA con respecto al maíz normal.

2 Aplicaciones

Además del valor agregado del alto contenido de aceite, los híbridos de maíz ACA

son una buena alternativa para la industria de alimentos por su alto valor energético, por lo que se ha implementado en la alimentación de cerdos, esto debido a una mayor proporción de aceite y proteínas con respecto al maíz convencional. Por otra parte, el alto contenido de aceite suele tener una mayor proporción de pigmentos amarillos (carotenoides, xantofilas) que son beneficiosos en las raciones de las comidas de las aves (Lambert 2001). La producción por contrato de grano ACA puede ofrecer a los productores mayores ganancias a través de comisiones. Sin embargo, los productores que producen ACA bajo contrato reciben comisiones por niveles elevados de aceite en el grano ACA, pero no por otros atributos potenciales asociados a este, incluidos niveles más altos de proteínas y aminoácidos esenciales (Thomison y col 2003).

Los híbridos de maíz ACA adaptados a las regiones subtropicales, son necesarios para cumplir con los requisitos existentes para fines industriales, pero además pueden utilizarse en la alimentación animal, como en aves y cerdos, ya que tienen un mayor valor energético que el maíz normal y pueden reemplazar fuentes dietéticas más elevadas en grasas y proteínas, puesto que se ha encontrado que se necesita menor cantidad de alimento para incrementar un kilogramo de peso (Lambert 2001; Singh y col 2014; Silva-Venancio y col 2019). El uso de estos híbridos se ha extendido a la producción de etanol y la extracción de aceite, además de que recientemente se propuso su uso para la producción de tortillas (Vázquez-Carrillo y col 2015).

C PÉPTIDOS BIOACTIVOS

1 Introducción

En actualidad las proteínas se investigan no sólo desde el punto de vista

nutricional o funcional, sino como materia prima para la obtención de péptidos bioactivos (Lee y col 2013), los cuales son secuencias cortas de aminoácidos (2-20 residuos) que permanecen inactivos dentro de la proteína pero que pueden ser liberados por hidrólisis enzimática tras un proceso industrial o digestión gastrointestinal e inducir diversos efectos benéficos, como por ejemplo, oxidación y degradación microbiana en los alimentos y como tratamiento en diversas enfermedades y trastornos (Nasri 2017; Sánchez y Vázquez 2017).

En comparación con las proteínas de origen animal, las proteínas vegetales se consideran fuentes accesibles y sostenibles de péptidos bioactivos (Han y col 2021), ofreciendo varias ventajas sobre los fármacos moleculares convencionales debido a su amplio espectro de acción terapéutica, con bajos niveles de toxicidad y diversidad estructural (Nasri 2017).

2 Hidrólisis enzimática

Los hidrolizados de proteínas se pueden obtener mediante el uso de varios procesos, como hidrólisis química, hidrólisis enzimática por enzimas proteolíticas o fermentación microbiana con bacterias proteolíticas (Saadi y col 2015). La hidrólisis enzimática es ampliamente utilizada para la producción de péptidos con propiedades biológicas deseables (Kristinsson y Rasco 2000), ya que el uso de proteasas específicas permite controlar el proceso para obtener hidrolizados reproducibles, además de la posibilidad de producir hidrolizados de proteínas con diferentes perfiles de péptidos debido a la relación enzima/sustrato (Nasri 2017). Estas enzimas catalizan la hidrólisis de enlaces peptídicos de las proteínas y pueden actuar en enlaces éster y

amida. En general, todas las proteasas tienen un cierto grado de especificidad para el sustrato basándose en la secuencia de aminoácidos que rodean directamente el enlace que se rompe. Esta especificidad y las condiciones de hidrólisis (pH, temperatura, tiempo) afectan el tamaño y las secuencias de aminoácidos en los péptidos, así como la cantidad de aminoácidos libres, lo que puede afectar la actividad biológica de los hidrolizados (Kristinsson y Rasco 2000; Soares de Castro y Sato 2015).

Debido a sus ventajas, que incluyen un alto rendimiento, un proceso eficiente y un tratamiento que ahorra tiempo, la hidrólisis enzimática se considera la mejor técnica debido a que es un tratamiento eficaz que puede inducir la bioactividad de proteínas intactas al momento de generar los péptidos, lo cual se puede escalar fácilmente en el laboratorio; sin embargo en la mayoría de los casos necesita ser controlada bajo condiciones operativas específicas (Saadi y col 2015).

El método de hidrólisis enzimática se basa en la naturaleza de la proteína de interés, la cual se somete al tratamiento enzimático bajo condiciones de pH y temperatura específicas de la proteasa utilizada, así como a un determinado tiempo de hidrólisis, lo cual es la base fundamental para crear péptidos específicos (Chakrabarti y col 2018).

En la **Figura 3** se explica la acción de las enzimas proteolíticas antes y después de la hidrólisis enzimática, generando polipéptidos, dipéptidos y aminoácidos libres, donde en un primer paso las enzimas están en estado activo y después se genera una desactivación de las mismas debido a la hidrólisis completa.

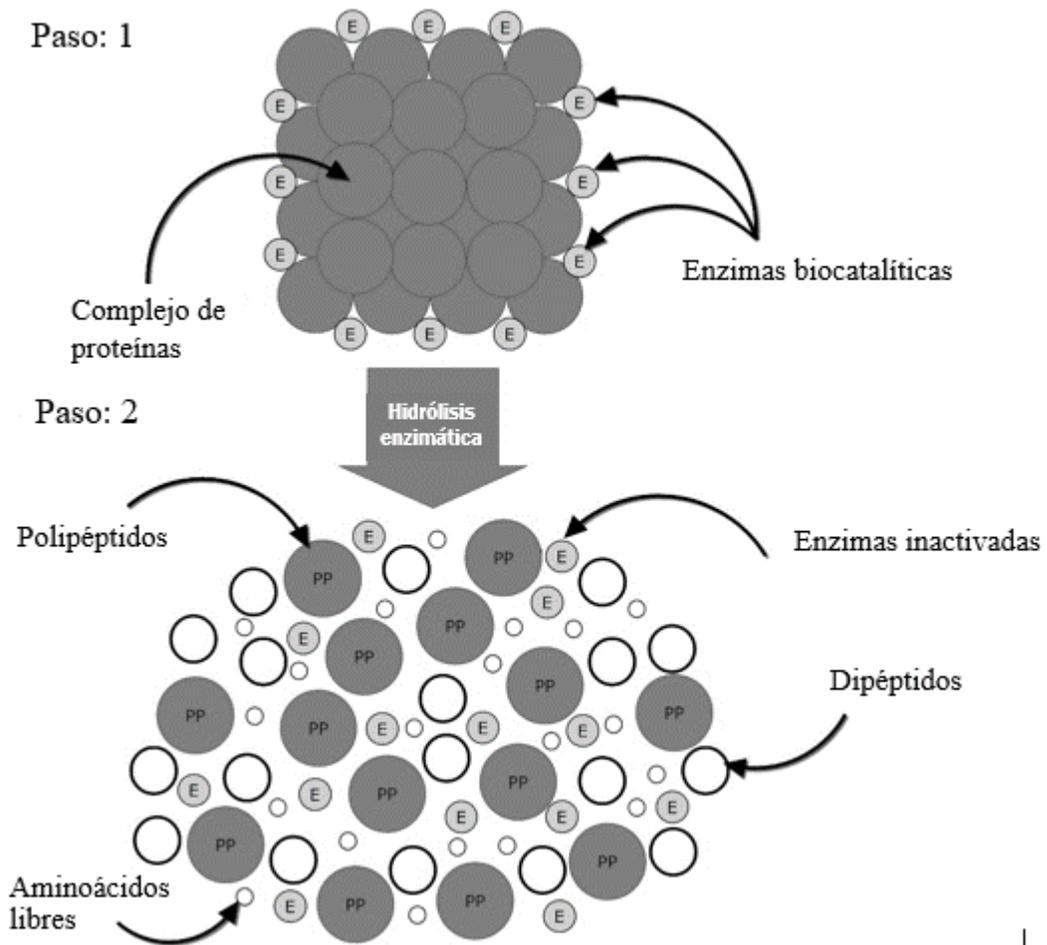


Figura 3. Esquema de la acción de enzimas proteolíticas sobre un complejo proteico. Paso 1: las enzimas están en estado activo, paso 2: generación de polipéptidos, dipéptidos y aminoácidos libres, así como la desactivación de las enzimas después de la hidrólisis enzimática completa (Saadi y col 2015).

Las proteasas pueden ser clasificadas por su origen (animal, vegetal, bacteriano o fúngico), por su mecanismo de acción catalítica (endo- o exo-actividad) o bien con base en su sitio catalítico (serin, tiol, carboxilo y metilo). De acuerdo con su acción catalítica, estas se clasifican en endoproteasas y exoproteasas, donde las primeras hidrolizan enlaces peptídicos dentro de la cadena de proteína en residuos específicos para producir péptidos relativamente grandes. Por ejemplo, durante la digestión intestinal de las proteínas, proteasas endógenas como la pepsina, tripsina, quimotripsina y pancreatina generan fragmentos activos libres, convirtiéndose en biopéptidos que interaccionan con grupos funcionales y carga, de esta manera se facilita el reconocimiento, transporte y absorción de los biopéptidos en su forma intacta.

Además, pueden ser transportados por diferentes mecanismos como difusión pasiva, endocitosis y a través del sistema linfático (Kristinsson y Rasco 2000; Saadi y col 2015; Soares de Castro y Sato 2015).

Por otro lado, las exoproteasas eliminan sistemáticamente los aminoácidos terminales de las proteínas y se denominan aminopeptidasas si es del N-terminal, o carboxipeptidasas si es del C-terminal, teniendo como ejemplo la alcalasa que se ha indicado como una de las más apropiadas para generar la hidrólisis de péptidos *in vitro*. En particular, la hidrólisis con alcalasa ha demostrado ser un enfoque eficaz para la generación de péptidos de proteínas vegetales (Clare y Swaisgood 2000; Kristinsson y Rasco 2000; Liu y col 2015). La alcalasa es una serin proteasa con amplia especificidad principalmente por sitios hidrofóbicos (Adler-Nissen 1986). Su amplia utilización es debida a varios factores: su actividad hidrolítica óptima se encuentra

comprendida en un intervalo de pH de 7-10 y temperatura entre 50 y 70 °C, lo que es de gran interés para evitar la contaminación en el proceso al impedir el crecimiento bacteriano. Tiene un amplio espectro de especificidad, es totalmente soluble en agua y cumple con las especificaciones recomendadas por la FAO/OMS, JECFA (Joint Expert Committee on Food Aditives) y FCC (Food Chemicals Codex) relativas a enzimas de uso alimentario.

3 Actividades biológicas de péptidos de maíz

Los hidrolizados de proteínas se definen como una mezcla compleja de oligopéptidos, péptidos y aminoácidos libres que se producen por hidrólisis parcial o extensa, mientras que los biopéptidos o péptidos bioactivos se definen como péptidos que poseen propiedades farmacológicas beneficiosas (Nasri 2017). En los péptidos bioactivos se tienen secuencias específicas de aminoácidos que poseen actividad biológica importante en los sistemas cardiovascular, digestivo, inmunitario y nervioso. Por ello, se han realizado numerosos estudios sobre la capacidad antioxidante, antihipertensiva, hipoglucemiante, hipotensora, antimicrobiana, anticoagulante, antitumoral, antiinflamatoria, así como también efectos inmunomoduladores e hipocolesterolémicos, entre otros; por lo tanto, pueden utilizarse como alternativa de fármacos sintéticos (Soares de Castro y Sato 2015; Nasri 2017).

Diversos estudios han reportado propiedades de péptidos bioactivos de maíz (**Cuadro 6**). Los péptidos aislados del maíz y sus coproductos industriales han demostrado ejercer una amplia variedad de efectos biológicos actuando como antioxidantes, inhibidores de enzimas renales y digestivas, quimioprotectores, así

Cuadro 6. Péptidos bioactivos y actividades asociadas en maíz.

Proteína/Muestra	Enzima	Péptido	Efecto bioactivo	Referencia
α -Zeína; Y-Zeína	Alcalasa + Neutrasa	LRP, LSP, LQP; LPP, VHLPP, VHLPPP	Antihipertensivo ¹	Hong y col (2008)
Zeína	Alcalasa	YA, LMCH	Antioxidante ²	Tang y col (2010)
Harina de maíz	Alcalasa	AY	Antihipertensivo ^{1,2}	Zheng y col (2006)
Harina de maíz	Alcalasa	YFCLT	Antioxidante ¹	Wang y col (2015b)
Harina de maíz	Alcalasa		Inhibidor de la ECA ²	Lin y col (2011)
Gluten de maíz	Alcalasa	GLLLPH	Antioxidante ¹	Wang y col (2016)
Zeínas y no-zeínas	Alcalasa		Antioxidante, antidiabética ¹	Félix-Medina y col (2023)
Harina de maíz	Alcalasa, Flavourzima, Alcalasa+ Flavourzima y Flavourzima+ Alcalasa.	CSQ APLA, YPKLAPNE, YPQLLPNE	Antioxidante ²	Jin y col (2016)

¹In vivo. ²In vitro .

Cuadro 6. Continuación.

Proteína/Muestra	Enzima	Péptido	Efecto bioactivo	Referencia
Harina de Gluten	Alcalasa	FLLQ, PVVLID, FLPL, LLPF, QLLPF, LMLF/MLLF	Quimioprotector Fibrosis ¹	Lv y col (2013)
Albúmina	Alcalasa	DIVVLPVG; MGVDPIAAI, otros.	Antiproliferativa Inhibidor de la ECA ¹ inhibidor de DPPIV ¹	Ortiz-Martinez y col (2017a)
Harina de maíz	Alcalasa	AY, FPLEMMPF	Actividad antioxidante ²	Yang y col (2007)
Harina de gluten	Alcalasa	QQQPW	Actividad antioxidante ²	Wang y col (2014)
Harina de gluten	Alcalasa, Tripsina y Flavourzima	STY-KR	Antioxidante y anti-diabética ¹	Karimi y col (2020)
Harina de gluten	Alcalasa	GHKPS	Actividad antioxidante e inhibición de peroxidación lipídica ¹	Zhuang y col (2013)

¹In vivo. ²In vitro .

como inhibidores del crecimiento e inductores de apoptosis en células cancerosas (Ortíz-Martínez y col 2017a).

a Actividad antihipertensiva

La hipertensión arterial es uno de los factores de riesgo más importantes, debido a que el individuo es más propenso a padecer enfermedades cerebrovasculares y fallas renales; este padecimiento afecta alrededor del 30% de la población adulta del mundo y causa importantes tasas de mortalidad (Stevens y col 2008). Existen algunos tratamientos farmacológicos que utilizan antihipertensivos como beta bloqueadores, antagonistas de calcio, inhibidores de la enzima convertidora de angiotensina (ECA) y simpaticolíticos o antihipertensivos no esenciales como los alfa-bloqueadores y antagonistas de los receptores de angiotensina II (Herrera-Chalé y col 2014).

La enzima convertidora de angiotensina I juega un papel fisiológico muy importante papel en el sistema renina-angiotensina (RAS), que regula la presión arterial humana y la homeostasis. La enzima cataliza la conversión del decapeptido inactivo angiotensina I en un potente vasoconstrictor, el octapéptido angiotensina II, eliminando el dipéptido C-terminal His-Leu (Lavoie y Sigmund 2003).

En el mercado existen varios inhibidores específicos de la ECA, como captopril, lisinopril y enalapril, que se utilizan para tratar y prevenir la hipertensión. Pero estos tratamientos traen consigo algunos efectos secundarios indeseables, como sequedad, tos, pérdida del gusto, insuficiencia renal y angioedema (Atkinson y Robertson 1979). Por tanto, en los últimos años ha aumentado el interés por encontrar inhibidores alternativos de ECA naturales y seguros (Nasri 2017).

Se ha puesto gran interés en hidrolizados de proteínas alimentarias con péptidos bioactivos que son inhibidores de la ECA. Los péptidos antihipertensivos más estudiados proceden de alimentos de origen animal, especialmente productos lácteos (Atkinson y Robertson 1979). Otros hidrolizados son de diversas fuentes alimentarias vegetales ricas en proteínas, como ajonjolí (Nakano y col 2006), germen de trigo (Jia y col 2010) y leche de soja (Tomatsu y col 2013). También en maíz se han reportado péptidos de este tipo (**Cuadro 6**). Puchalska y col (2012) mostraron que tres tripéptidos (LQP, LSP y LRP) derivados de la subfracción α -zeínas presentan una actividad antihipertensiva extremadamente alta.

b Actividad antioxidante

Los radicales libres se generan a través de reacciones fisiológicas normales dentro del cuerpo. La producción excesiva de radicales libres puede causar efectos nocivos sobre las membranas, las proteínas y el ADN de los seres humanos, lo que puede iniciar una serie de enfermedades crónicas como el envejecimiento, el cáncer y las enfermedades cardiovasculares (Jin y col 2016). Los compuestos antioxidantes tienen la capacidad de inhibir o interrumpir las reacciones de transformación que causan daños a las biomoléculas de las células (Angerhofer y col 2009). La actividad antioxidante se define como la capacidad de una sustancia para inhibir la degradación oxidativa, por ejemplo la peroxidación lipídica, de tal manera que un antioxidante actúa principalmente a través de la inactivación de radicales libres (Londoño-Londoño 2012).

En los últimos años se han obtenido hidrolizados de proteínas antioxidantes o péptidos de proteínas vegetales y animales para captar radicales libres, inactivar los

intermediarios reactivos y/o quelar los metales de transición pro-oxidativos, todos ellos provocados por el estrés oxidativo (Jin y col 2016). Los principales antioxidantes en el maíz son los compuestos fenólicos, carotenoides y vitamina E (Abdel-Aal y col 2006); sin embargo, también se han identificado algunos péptidos obtenidos de hidrolizados de proteínas de maíz con dicha característica. Esta actividad se explica por la presencia de aminoácidos específicos con captación y reducción de radicales, como lisina, tirosina, fenilalanina, prolina, alanina, histidina y leucina (Zhou y col 2015). Zheng y col (2006) estudiaron la capacidad antioxidante de péptidos obtenidos utilizando gluten de maíz extrudido, donde péptidos de bajo peso molecular (< 5 kDa) exhibieron una mayor actividad antioxidante (Li y col 2008; Zhuang y col 2013; Tang y Zhuang 2014). La acción antioxidante se debe principalmente a la diversidad de acción de los péptidos bioactivos y, esto es atribuido a los efectos cooperativos de varios mecanismos, incluida la quelación de iones metálicos, así como la captación de radicales libres, inhibición de la peroxidación lipídica, entre otras (Nasri 2017). Los péptidos de menos de 3 kDa han demostrado presentar potente actividad antioxidante en ensayos *in vitro* en células HepG2 y Caco2 expuestas a un alto estrés oxidativo (Wang y col 2015a). Además, en estudios realizados en modelos de macrófagos, los péptidos de maíz han mostrado efectos antiinflamatorios (Hernández-Ledesma y col 2009). Estas propiedades son relevantes debido a la relación entre el estrés oxidativo y procesos degenerativos como la carcinogénesis. Por lo tanto, la actividad antioxidante que presentan los péptidos de maíz podría ser beneficiosa para el tratamiento de cáncer.

c Actividad hipoglucémica

La diabetes mellitus (DM) se define como un grupo de trastornos metabólicos, caracterizado por altos niveles de glucosa en la sangre debido a deficiencias en la secreción de insulina, así como por resistencia periférica a esta misma, lo que conduce a hiperglucemia crónica y alteraciones del metabolismo (Rojas de P y col 2012). Hay tres tipos principales de diabetes: diabetes mellitus tipo 1, diabetes mellitus tipo 2 (DM2) y diabetes gestacional. La DM2 es el tipo más común de diabetes y comprende entre el 90 y el 95% de la población mundial de diabéticos (Valencia-Mejía y col 2019). Uno de los principales síntomas de la DM2 es la hiperglucemia posprandial, que constituye un factor de riesgo importante que contribuye a las complicaciones asociadas con la diabetes, incluyendo un alto riesgo de padecer hipertensión, cardiopatía y accidente cerebrovascular (Spínola y col 2019). La alta incidencia de diabetes se atribuye a cambios en el estilo de vida, el consumo de alimentos ricos en grasas y carbohidratos, así como una vida sedentaria que conduce a la obesidad (Ardisson-Korat y col 2014). La diabetes se puede controlar disminuyendo la hiperglucemia postprandial y una forma de lograrlo es mediante el control o retraso de la absorción de glucosa en el intestino delgado (Campbell y Rains 2014). Para ello se utilizan varios agentes hipoglucemiantes orales sintéticos, pero alrededor del 40% de estos compuestos provocan alteraciones en los procesos bioquímicos del cuerpo humano que pueden conducir a varios efectos no deseados, incluyendo trastornos gastrointestinales y hepáticos. La insulina es ampliamente usada como fármaco sintético en la actualidad, sin embargo tiene la desventaja de que no puede administrarse por vía oral y suele causar efectos secundarios graves, así como

toxicidad (Tolman y Chandramouli 2003).

Diversos estudios han reportado que la α -glucosidasa y la α -amilasa juegan papeles importantes en el ajuste de la insulina, debido a que el almidón y otros polisacáridos son hidrolizados por la α -amilasa a oligosacáridos, los cuales se hidrolizan nuevamente por acción de la enzima α -glucosidasa que está presente en la mucosa epitelial del intestino delgado, escindiendo los enlaces glucosídicos de los oligosacáridos y liberando monosacáridos, los cuales son absorbidos (Kim y col 2014). De forma más específica, las α -amilasas son enzimas que se encuentran en las glándulas salivales que se secretan en la boca, así como en el páncreas y en el intestino delgado. Su papel principal es catalizar la hidrólisis del almidón, siendo enzimas de acción endo- ya que atacan las partes interiores de las moléculas de amilosa (un glucano esencialmente lineal con enlaces α -(1 \rightarrow 4)) y de amilopectina (porciones lineales con enlaces α -(1 \rightarrow 4) que posee ramificaciones con enlaces α -(1 \rightarrow 6)). Específicamente, las α -amilasas hidrolizan los enlaces glucosídicos α -(1 \rightarrow 4) internos, lo que conduce a la producción de maltosa, maltotriosa, maltotetraosa y maltodextrinas. Por otra parte, la α -glucosidasa se encuentra en la superficie luminal de los enterocitos y puede hidrolizar selectivamente los enlaces α -(1 \rightarrow 4) (almidón o disacáridos) del extremo no reductor, lo que conduce a la liberación de α -glucosa. Los inhibidores de α -glucosidasa pueden reducir la tasa de absorción de glucosa al retrasar la digestión de los carbohidratos que involucra la escisión hidrolítica de disacáridos (maltosa y sacarosa) en monosacáridos (glucosa y fructosa) (**Figura 4**) (Papoutsis y col 2021). Por lo tanto, la inhibición de estas enzimas se considera una alternativa

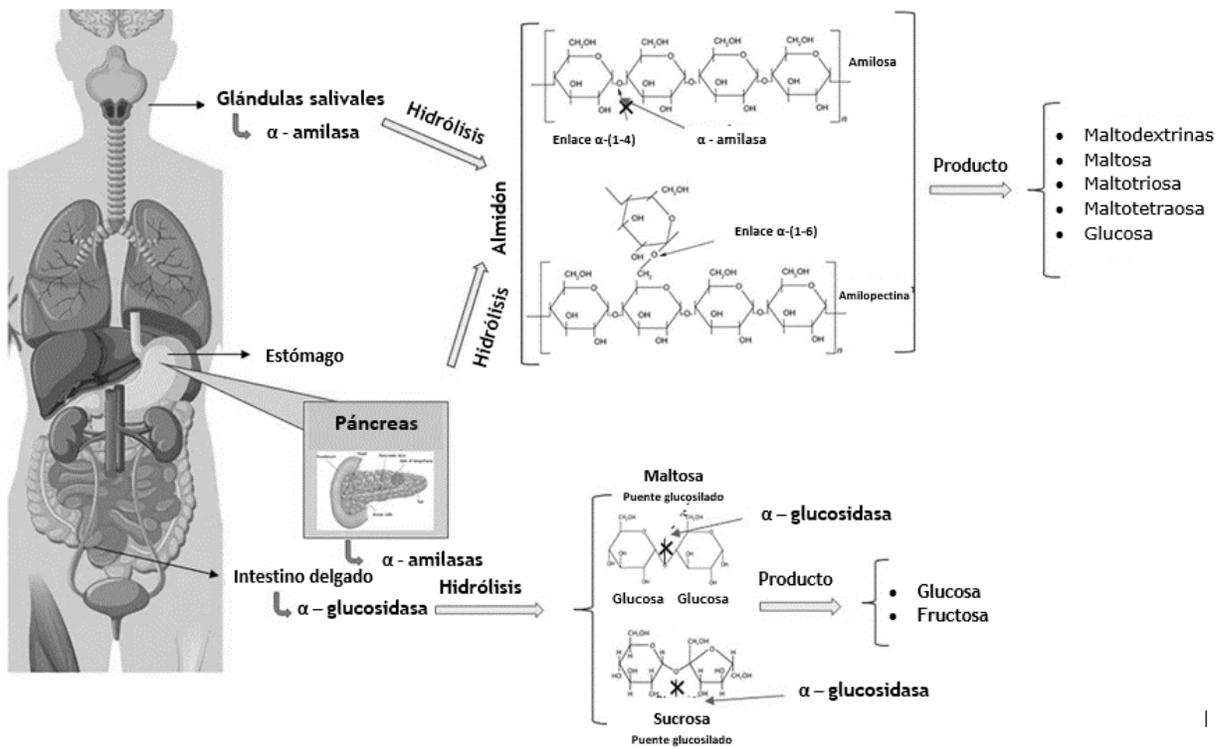


Figura 4. Localización y acción de las enzimas α -amilasa y α -glucosidasa (Papoutsis y col 2021).

útil en el tratamiento de la diabetes ya que al retrasar la digestión de los carbohidratos se disminuye la liberación de glucosa libre, reduciendo así los niveles de glucosa en sangre posprandiales (Bhandari y col 2008).

Existen inhibidores de la α -glucosidasa que reducen la digestión de los hidratos de carbono a través de varios mecanismos, los cuales pueden ser competitivos, no competitivos y alostéricos, provocando que la absorción de glucosa se retrase y disminuya la hiperglucemia sin necesidad de secreción de insulina (**Figura 5**) (Bailey y Krentz 2010; Sohrabi y col 2022). Diversos compuestos hipoglucemiantes libres pueden ejercer tal actividad y disminuir los niveles de glucosa en sangre, siendo la acarbosa y miglitol los principales fármacos para este fin (Bailey y Krentz 2010; Preetha y col 2012; Konrad y col 2014). Todo esto ha fomentado la búsqueda de nuevos agentes hipoglucemiantes más efectivos, específicos, seguros y naturales como alternativa a los sintéticos, lo que podría contribuir a una respuesta terapéutica positiva con efectos no deseados mínimos o nulos (Wang y col 2010; Liu y col 2011). En este contexto, se han propuesto tratamientos alternativos basados en péptidos de diferentes fuentes alimenticias en la prevención y control de la diabetes, demostrando que las proteínas e hidrolizados de proteínas pueden tener actividad inhibitoria específica de gran interés científico para tratar diferentes enfermedades.

Estudios recientes han demostrado la gran actividad antidiabética que tienen los péptidos generados a partir de cereales (Uraipong y Zhao 2016; Karimi y col 2020). Obaroakpo y col (2019) estudiaron la actividad inhibitoria de α -glucosidasa de hidrolizados de proteínas en bebidas de yogurt de quinoa germinada, donde se llegó a la conclusión que los aminoácidos alifáticos hidrofóbicos como la glicina, la leucina

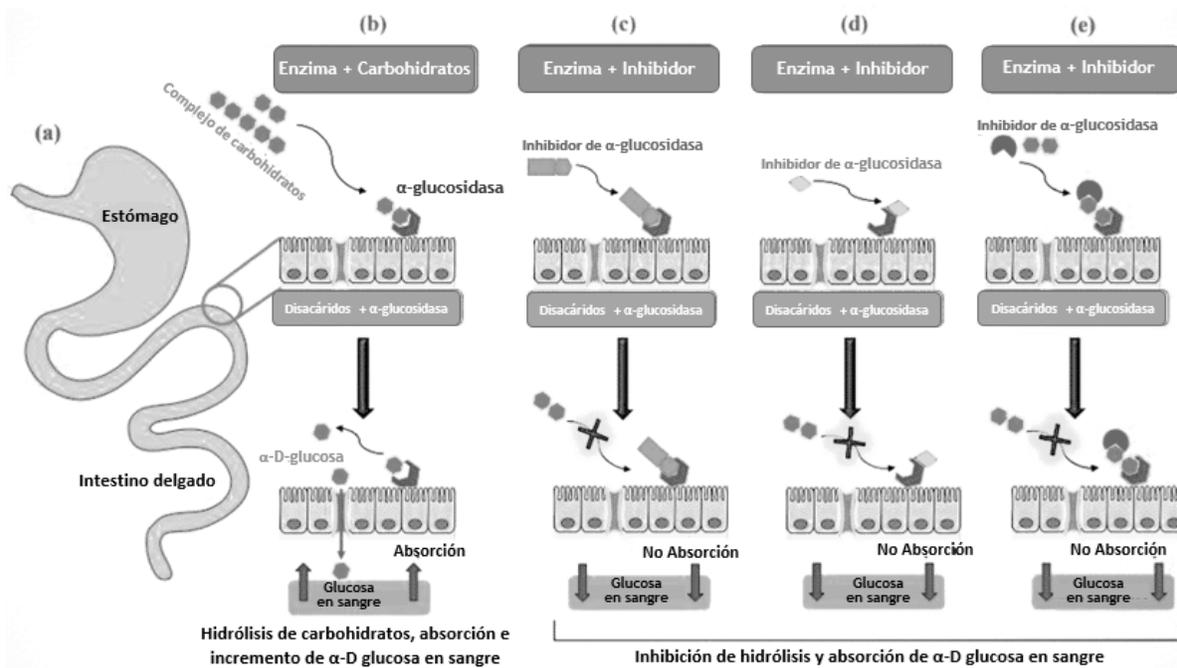


Figura 5. Esquema de acción de la enzima α -glucosidasa y modos básicos de acción de sus inhibidores. (a) Diagrama esquemático del intestino delgado. (b) Hidrólisis de carbohidratos complejos por α -glucosidasa a lo largo del borde en cepillo del intestino delgado para liberar α -D-glucosa. Modos básicos de acción de los inhibidores de α -glucosidasa que conduce a una disminución de los niveles de glucosa en sangre posprandiales: (c) inhibición competitiva, (d) inhibición no competitiva, (e) inhibición acompetitiva (Sohrabi y col 2022).

y la alanina promueven la capacidad antidiabética de los hidrolizados y son agentes terapéuticos potenciales contra la hipertensión y la diabetes. Por otra parte, Ibrahim y col (2018) propusieron que la mayoría de los péptidos inhibidores de la α -glucosidasa altamente activos tienen alguna característica específica, la cual incluye aminoácidos con una cadena lateral de hidroxilo o una cadena básica como lisina o arginina en el extremo N-terminal, así como prolina preferentemente en la penúltima posición C-terminal y la presencia de alanina o metionina en el extremo C-terminal.

Por otro lado, existen hormonas intestinales que mejoran la secreción de insulina dependiente de la glucosa llamadas incretinas. Dentro de las más importantes se encuentran el polipéptido insulínico dependiente de glucosa (GIP) y el péptido 1 similar al glucagón (GLP-1). Debido a sus efectos estimulantes sobre la secreción de insulina dependiente de la glucosa y la proliferación pancreática, los sistemas de incretinas son un objetivo convincente para el tratamiento de la intolerancia a la glucosa y la DM2. Ambas incretinas se degradan e inactivan inmediatamente por la dipeptidil peptidasa-IV (DPP-IV), por lo que los análogos de GLP-1 estables y los inhibidores de DPP-IV se utilizan actualmente como fármacos clínicos inhibidores de DPP-IV (Quintanilla-García y Zúñiga-Guajardo 2010).

De igual manera se ha demostrado la alta actividad ejercida por hidrolizados de zeínas sobre la secreción de GLP-1 en estudios con modelos murinos (Hira y col 2009; Mochida y col 2010). Higuchi y col (2013) reportaron que la administración oral de péptidos de zeínas mejoró la capacidad de ratas, tanto normales como diabéticas, para tolerar la glucosa por su actividad liberadora de incretinas.

De acuerdo con lo anterior, los mecanismos mediante los cuales los péptidos bioactivos regulan los niveles de glucosa en sangre incluyen la inhibición de enzimas específicas como α -amilasa, α -glucosidasa y la DPP-IV ayudando a tener control en los índices de glucosa al mejorar la secreción de GLP-1 y de insulina (Valencia-Mejía y col 2019; Acquah y col 2020).

IV. JUSTIFICACIÓN

El maíz es uno de los cereales de mayor importancia a nivel mundial por ser una buena fuente de nutrientes y compuestos bioactivos con beneficios para la salud. Entre los maíces especializados que se han generado se encuentran los maíces con alto contenido de aceite (ACA), los cuales se caracterizan por tener más de 6% de aceite y un alto contenido de ácidos grasos esenciales poliinsaturados, además de un aumento en el contenido de proteínas. Estos maíces se han tratado de introducir en la producción comercial de México, pero a la fecha sus beneficios no han sido aprovechados, por lo que es importante estudiar las características nutraceuticas de estos materiales para darles valor agregado y motivar su uso.

Los hidrolizados proteicos se han relacionado con actividades biológicas importantes, por lo que actualmente se cuenta con mucha información de péptidos bioactivos obtenidos de diferentes variedades de maíces donde se han reportado actividades benéficas para la salud humana y con el potencial de reducir el riesgo de enfermedades crónicas importantes. Sin embargo, en maíz ACA no se han encontrado reportes de péptidos bioactivos de hidrolizados de las diferentes proteínas de almacenamiento. En este sentido, el identificar y caracterizar péptidos con actividad antioxidante e inhibitoria de α -glucosidasa en genotipos de maíz ACA permitirá conocer el potencial uso de estos materiales para mejorar la salud humana.

V. HIPÓTESIS

Los hidrolizados de fracciones proteicas de híbridos de maíz ACA obtenidos con alcalasa presentan mayor actividad antioxidante e inhibición de la enzima α -glucosidasa que los obtenidos de híbridos comerciales normales.

VI. OBJETIVOS

A OBJETIVO GENERAL

Evaluar la actividad antioxidante e inhibición de la enzima α -glucosidasa de hidrolizados de fracciones proteicas de híbridos de maíz con alto contenido de aceite.

B OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Obtener hidrolizados de las fracciones albúminas, globulinas y prolaminas de híbridos de maíz con alto contenido de aceite.
2. Evaluar la actividad antioxidante *in vitro* de los hidrolizados de las fracciones proteicas de maíces con alto contenido de aceite.
3. Evaluar la actividad inhibitoria de la enzima α -glucosidasa de los hidrolizados de las fracciones proteicas de maíces con alto contenido de aceite.

VII. MATERIALES Y MÉTODOS

A MATERIALES

Se utilizaron cuatro maíces híbridos con alto contenido en aceite, dos amarillos (CML451/CML486 x PAN133 y PAN157 x PAB218) y dos blancos (PBN85 x PBB183 y PBN11 x PBN84), así como un híbrido comercial (Armadillo, Asgrow©) como referencia. Estos materiales fueron cultivados en el campo experimental Valle del Fuerte del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) durante el ciclo otoño-invierno 2019-2020, utilizando las condiciones establecidas en la agenda técnica agrícola de Sinaloa (INIFAP 2017). Se cosecharon granos en estado maduro y humedad promedio del 14%, los cuales fueron proporcionados por el MC. Luis Alberto Peinado Fuentes.

B MÉTODOS

1 Extracción y cuantificación de las fracciones de proteínas

Se obtuvieron harinas de los granos maduros de maíz utilizando un molino de bolas MM40 (Retsch, Haan, Alemania). La harina primeramente se desgrasó con hexano en una proporción 1:10 (p/v). Las fracciones de proteína se extrajeron secuencialmente de la harina desgrasada usando una modificación del protocolo de solubilidad diferencial de Laundry y Moureaux (Malumba y col 2008; Ortíz-Martínez y col 2017b). Posteriormente, se añadió la solución de extracción I (agua desionizada) a la harina en una proporción 1:10 (p/v) y se agitó durante 20 s mediante balanceo (Varimix, Thermolyne, Dubuque, IA), se incubó a 25 °C durante 2 h con agitación a 500 rpm. La mezcla se centrifugó a 16,000 g por 30 min a 4 °C (5804, Eppendorf, EUA)

y el sobrenadante correspondió a la fracción de albúminas (Alb) (Landry y Moureaux 1980; Parris y col 2006; Malumba y col 2008), el cual se liofilizó (25EL, VirTis Co., Gardiner, NY, EUA). La muestra liofilizada se lavó secuencialmente con metanol (1:10, p/v) y acetona (1:10, p/v), centrifugando entre cada lavado (4,000 g, 10 min, 4 °C). Se descartaron los sobrenadantes y se dejó secar la pastilla, para después almacenarse a -20°C hasta su uso.

A la pastilla obtenida de la extracción de albúminas se le agregó amortiguador de extracción II (NaCl 0.5 M, pH 7) en una proporción 1:10 (p/v) y la mezcla se trató bajo las mismas condiciones. El sobrenadante recolectado después de centrifugar correspondió a la fracción de globulinas (Glb), las cuales se dializaron en contra de agua desionizada por 48 h, con cambios de agua cada 8 h. La muestra dializada se liofilizó (VirTis Co.), se lavó como se describió para albúminas y se almacenó a -20 °C hasta su uso.

Para extraer las prolaminas, se añadió amortiguador de extracción III (EtOH al 70%) a la pastilla obtenida de las globulinas en una proporción 1:10 (p/v), la mezcla se agitó por 20 s y se incubó a 25 °C durante 1 h a 500 rpm. La mezcla se centrifugó (16,000 g, 30 min, 4 °C) (Eppendorf, EUA) y el sobrenadante se tomó como la fracción de prolaminas (Pro) (Parris y col 2006; Malumba y col 2008). El etanol se eliminó con un rotavapor (BÜCHI R-124, Brinkmann Instruments, EUA) a 337 mbar y 40 °C. La muestra concentrada se liofilizó, se lavó como se describió para albúminas y se almacenó a -20 °C hasta su uso.

La concentración de las proteínas se determinó colorimétricamente utilizando el método del ácido bicinconínico (BCA) (Brown y col 1989) para las prolaminas y el método de Bradford (1976) para albúminas y globulinas. En ambos casos se utilizó albúmina de suero bovino (BSA) como estándar.

2 Obtención de hidrolizados proteínicos

Las fracciones proteicas se resuspendieron en agua (pH=8.0) en una proporción 1:10 (p/v) y se colocaron a 80 °C por 5 min para desnaturalizarlas y mejorar la disponibilidad de los sitios de corte de la enzima. Las muestras se dejaron enfriar, luego se colocaron a 55 °C durante 5 min y posteriormente se adicionó la enzima alcalasa (0.5 UA/g de proteína) (Ortíz-Martínez y col 2017b). Las muestras se mantuvieron a 50 °C por 120 min (Alb, Glb) y 200 min (Pro) a pH constante (pH=8.0). Para finalizar la hidrólisis la temperatura se elevó a 80 °C por 20 min. Las muestras se dejaron enfriar a temperatura ambiente por 10 min y se centrifugaron (5,000 g, 20 min, 4 °C) (5804R, Eppendorf, EUA). Se recuperó el sobrenadante y se pasó a través de filtros de 0.45 µm (PVDF membrana HPLC certified, Pall, EUA). Finalmente, el filtrado se pasó por tubos de corte de peso molecular de 10 kDa para eliminar restos de proteínas sin hidrolizar. El filtrado recuperado se liofilizó y se almacenó a -20 °C hasta su posterior uso.

El grado de hidrólisis (GH) se determinó por la metodología de Adler-Nissen (1986) con la siguiente formula:

$$GH\% = \left[\frac{(B \times Nb)}{MP} \right] \times \left(\frac{1}{\alpha} \right) \times \left(\frac{1}{h_{tot}} \right) \times 100$$

Dónde:

Nb = Normalidad del NaOH

B = Base consumida

MP = Cantidad de proteína

α = grado medio de disociación de α -NH₂

h_{tot} = 15 min

El rendimiento (%) se obtuvo dividiendo el peso del hidrolizado obtenido entre el peso de la proteína y multiplicando por 100.

3 Evaluación de la actividad antioxidante

a Método DPPH

La actividad anti-radical DPPH de las muestras se determinó utilizando la metodología descrita por Brand-Williams y col (1995) con las modificaciones de Mejri y col (2017). Se preparó una solución del radical DPPH en metanol (100 μ M). Se tomaron 100 μ L de hidrolizado (5 mg/mL) y se mezclaron con 100 μ L de la solución de DPPH en una microplaca de 96 pozos. Después de 30 min de incubación a 37 °C, se midió la absorbancia a 520 nm en un lector de microplacas modelo Multiskan Sky (Thermo Fisher, Massachusetts, EUA). Para la cuantificación se preparó una curva estándar de Trolox (0 - 200 μ g/mL). Los resultados se expresaron como porcentaje de inhibición del radical DPPH y como μ mol equivalentes de Trolox por gramo de hidrolizado en base seca (μ mol ET/g H bs).

b Método ABTS

Se utilizó el método de Re y col (1999) con las modificaciones de Mejri y col (2017). En una microplaca de 96 pozos se colocaron 20 μ L de hidrolizado resuspendido en

PBS (1 mg/mL) y se mezclaron con 180 μ L de la solución del radical ABTS \bullet + (Abs 734 nm = 1.4 ± 1). La mezcla se dejó reaccionar 10 min a temperatura ambiente en la oscuridad y posteriormente se leyó el cambio en la absorbancia a 734 nm con respecto a la referencia (PBS) en un lector de microplacas modelo Multiskan Sky (Thermo Fisher, Massachusetts, EUA). Para la cuantificación se preparó una curva estándar de Trolox (0 - 100 μ g/mL). Los resultados se expresaron como porcentaje de inhibición del radical ABTS y como μ mol ET/g H bs.

c Método ORAC

El ensayo de ORAC mide la capacidad de un antioxidante de inhibir, mediante un mecanismo de transferencia de hidrógenos, la oxidación de la fluoresceína inducida por los radicales peroxilo generados por APPH (2,2'-azobis dihidrocloruro). Los hidrolizados (10 mg/mL) se diluyeron (1:500 v/v) con PBS (75 mM, pH 7.4). En una microplaca oscura de 96 pozos con fondo plano se agregaron 25 μ L de la muestra, 25 μ L de PBS (blanco) o 25 μ L de Trolox (25 - 125 μ mol) (curva estándar). La placa se colocó en un lector de fluorescencia (Synergy 2 SL, BioTek Instruments, EUA), donde se añadieron 200 μ L de fluoresceína (0.96 μ M) y 75 μ L de AAPH (95.8 mM) a cada pozo. La intensidad de fluorescencia (485 nm (ex)/525 nm (em)) se midió por un periodo de 75 min (37 °C) en intervalos de 1 min (Huang y col 2004). La capacidad antioxidante se obtuvo calculando la diferencia entre la disminución en la intensidad de fluorescencia de la muestra y del control Trolox, comparando las áreas bajo la curva generada por el equipo. Los resultados fueron expresados como (μ mol ET/ g H bs).

4 Evaluación de la actividad inhibitoria de la enzima α -glucosidasa

La actividad inhibitoria de α -glucosidasa se determinó a través de la medición indirecta del *p*-nitrofenol liberado por la enzima al hidrolizar al *p*-nitrofenil- α -D-glucopiranosido; en donde una unidad de la enzima libera 1 μ mol/min de *p*-nitrofenol cuyo máximo de absorción es a 405 nm, por lo que, a mayor inhibición de la enzima, menor será la concentración de *p*-nitrofenol encontrada. La evaluación se realizó de acuerdo con el protocolo establecido por López-Angulo y col (2019), en una microplaca de 96 pozos se colocaron 50 μ L de hidrolizados (100 mg/mL) y se mezclaron con 100 μ L de la solución de α -glucosidasa (0.25 U/mL) y la mezcla se incubó durante 10 min a 37 °C. Posteriormente, se agregaron 50 μ L de *p*-nitrofenil- α -D-glucopiranosido (5 mmol), la mezcla se incubó 10 min y se midió la absorbancia a 405 nm. Los resultados se expresaron como porcentaje de inhibición de acuerdo con la siguiente formula:

$$\% \text{ Inhibición} = 100 * [1 - (\text{Abs muestra} / \text{Abs control})]$$

Dónde: Abs control corresponde a la mezcla de reacción sin la muestra.

5 Análisis estadístico

Se utilizó un análisis de varianza unifactorial, donde el factor fue el tipo de maíz estudiado. La comparación de medias se realizó mediante la prueba de Fisher con un nivel de significancia del 5%. Los análisis se realizaron con el programa Statgraphics Plus 5.1 (StatPoint Technologies, Inc., Warrenton VA, EUA). Las relaciones entre las variables analizadas para maíces ACA y el híbrido comercial se determinaron mediante un análisis de componentes principales (PCA) usando el programa STATA versión 11.1 (Stata Corp, College Station, Texas, USA).

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A CONTENIDO DE ALBÚMINAS, GLOBULINAS Y PROLAMINAS EN MAÍCES ACA

Las proteínas del maíz se clasifican en cuatro grupos de acuerdo a su solubilidad: albúminas (solubles en agua), globulinas (solubles en sales), prolaminas (solubles en alcohol) y glutelinas (soluble en condiciones reductoras) (Díaz-Gómez y col 2017). Las albúminas y globulinas se encuentran localizadas principalmente en el germen y representan menos del 5% del contenido de proteína total en el grano del maíz. Las proteínas mayoritarias son prolaminas (40-50%) y glutelinas (40%), encontrándose ambas en el endospermo (Díaz-Gómez y col 2017; Larkins 2019).

En la **Figura 6** se muestra el contenido de albúminas, globulinas y prolaminas de los maíces ACA y el híbrido comercial Armadillo. En general, los maíces amarillos CML451/CML486 x PAN133 y PAN157 x PAB218 presentaron mayor contenido de albúminas que los maíces blancos (PBN85 x PBB183, PBN11 x PBN84 y Armadillo). En esta fracción se observó un rango de 3.74 a 6.30 mg/100 mg de proteína en los maíces ACA, valores hasta 2.3 veces superiores al obtenido en el híbrido comercial. En relación con las globulinas, con excepción del maíz PAN157 x PAB218, se observó un mayor contenido de esta fracción en los maíces ACA con respecto al híbrido comercial (**Figura 6**).

Lee y col (2001) reportaron un mayor contenido de proteína en maíz ACA con respecto al maíz normal. A pesar de no haber realizado la cuantificación de proteína total en el presente estudio, al considerar el promedio de las diferentes fracciones, el

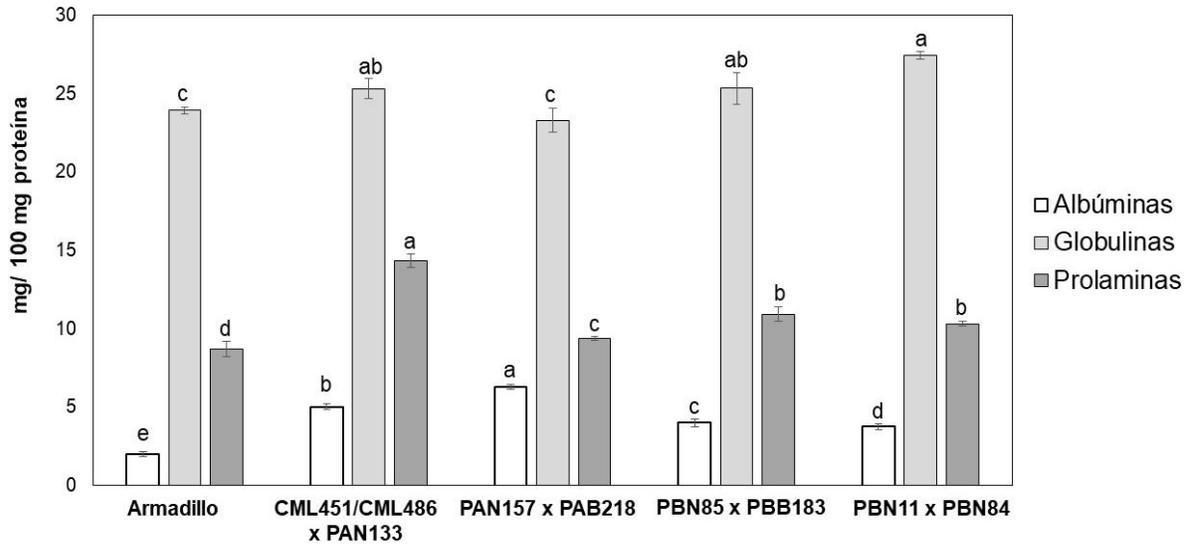


Figura 6. Contenido de albúminas, globulinas y prolaminas en los maíces ACA y un híbrido comercial. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los diferentes maíces para una misma fracción de proteína con base en la prueba Fisher ($p \leq 0.05$). La barra indica la desviación estándar observada.

contenido de proteína de los maíces ACA (38.9-44.7 mg/100 mg proteína) fue mayor al testigo (34.6 mg/100 mg proteína), siendo los maíces CML451/CML486 x PAN 133 y PBN11 x PBN84 los de mayor contenido de proteína. Las principales diferencias se observan en la distribución de las fracciones, lo que corresponde con lo reportado previamente en maíces ACA donde se incrementa la proporción de albúminas y globulinas como consecuencia de un aumento en el tamaño del germen (Lambert 2001; Dudley y col 2007).

B GRADO DE HIDRÓLISIS Y RENDIMIENTO DE HIDROLIZADOS DE FRACCIONES PROTEICAS DE MAÍCES ACA

1 Grado de hidrólisis (GH)

El GH se define como el porcentaje de enlaces peptídicos escindidos por una proteasa. El uso de enzimas proteolíticas permite una mejor hidrólisis, debido a que presentan una mejor especificidad respecto a los enlaces que fragmentan. La alcalasa es una endopeptidasa con una amplia especificidad que corta favorablemente los enlaces de residuos de aminoácidos hidrofóbicos (triptófano, fenilalanina, leucina, isoleucina, valina y metionina), resultando en valores altos de GH que aumentan conforme se extiende el tiempo reacción hasta alcanzar un máximo (Vioque y col 1999).

El grado de hidrólisis de albúminas y globulinas se muestra en las **Figuras 7 y 8**, respectivamente. Ambas fracciones mostraron un comportamiento similar, presentándose un incremento significativo durante los primeros 10 min, seguido de un incremento moderado hasta los 20 min y, posteriormente cambios leves con un

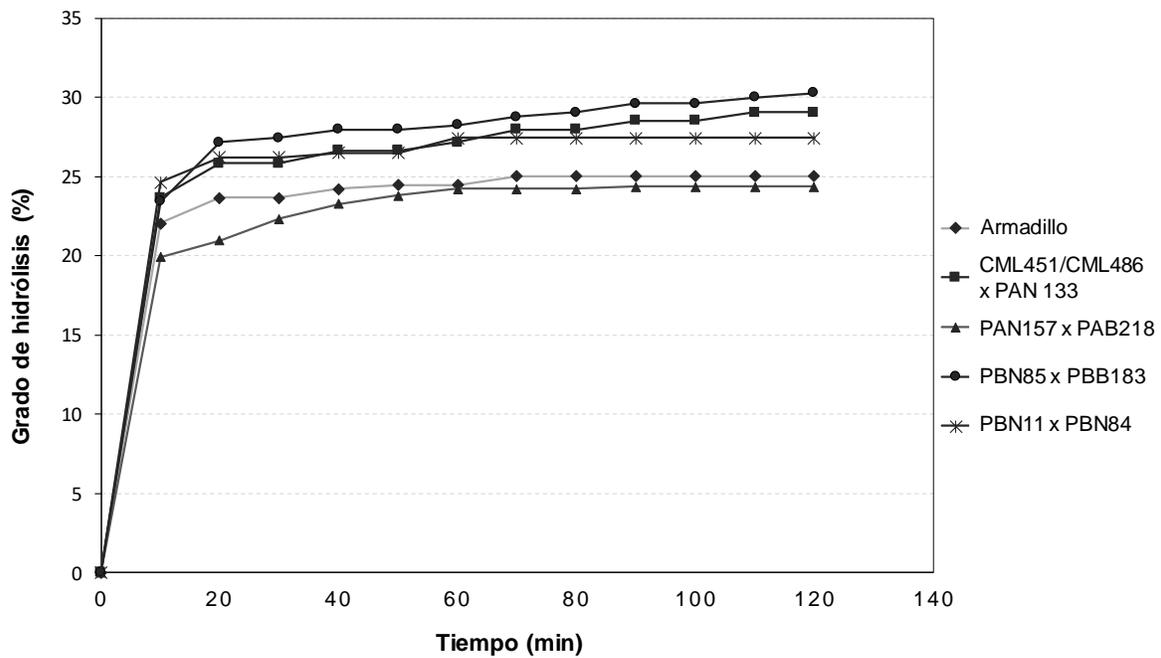


Figura 7. Grado de hidrólisis de albúminas de maíces ACA tratadas con alcalasa.

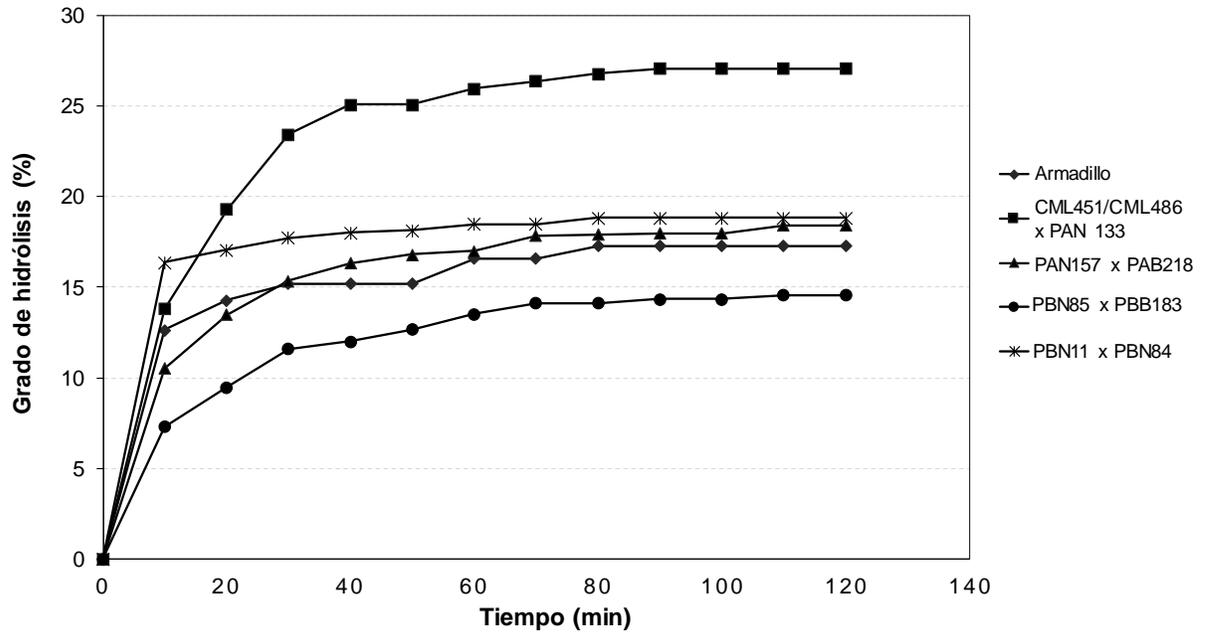


Figura 8. Grado de hidrólisis de globulinas de maíces ACA tratadas con alcalasa.

comportamiento asintótico. Estos resultados indican que el mayor rompimiento de enlaces peptídicos en albúminas y globulinas ocurre durante los primeros 20 min de hidrólisis, lo cual supone una mayor disponibilidad de enlaces peptídicos escindibles en la proteína durante este tiempo y posteriormente disminuyen de manera considerable. Durante la hidrólisis, además de disminuir el tamaño de los péptidos se incrementa la generación de grupos polares ($-NH_2$ y COO^-), traduciéndose en un incremento de la solubilidad (Vioque y Millán 2005; Karimi y col 2020).

En albúminas, el GH al final de los 120 min fue significativamente mayor en los maíces PBN85 x PBB183 (30.27%) y CML451/CML486 x PAN133 (28.92%), mientras que PAN157 x PAB218 fue el que presentó un menor grado de hidrólisis (24.35%) (**Figura 7**). En el caso de las globulinas, el GH (120 min) de CML451/CML486 x PAN133 (27.09%) fue significativamente más alto que el del resto de los maíces ACA (14.56 - 18.82%) y el híbrido comercial (17.28%) (**Figura 8**). Los valores observados de GH para albúminas y globulinas son similares a los reportados previamente en hidrolizados de maíz obtenidos con alcalasa. Karimi y col (2020) obtuvieron un GH de 17.5% en hidrolizados de germen de maíz, mientras que en harina de gluten de maíz se han reportado valores de GH de 17.8 a 24.4% (Zhuang y col 2013; Jin y col 2016).

Las prolaminas mostraron una cinética de hidrólisis muy diferente a lo observado en albúminas y globulinas, presentándose una menor pendiente y un incremento constante en la hidrólisis aún después de 120 min de incubación, logrando estabilizarse hasta los 200 min (**Figura 9**). Con respecto a esta fracción los mayores valores de GH se observaron en los maíces PBN11 x PBN84 (11.14%) y

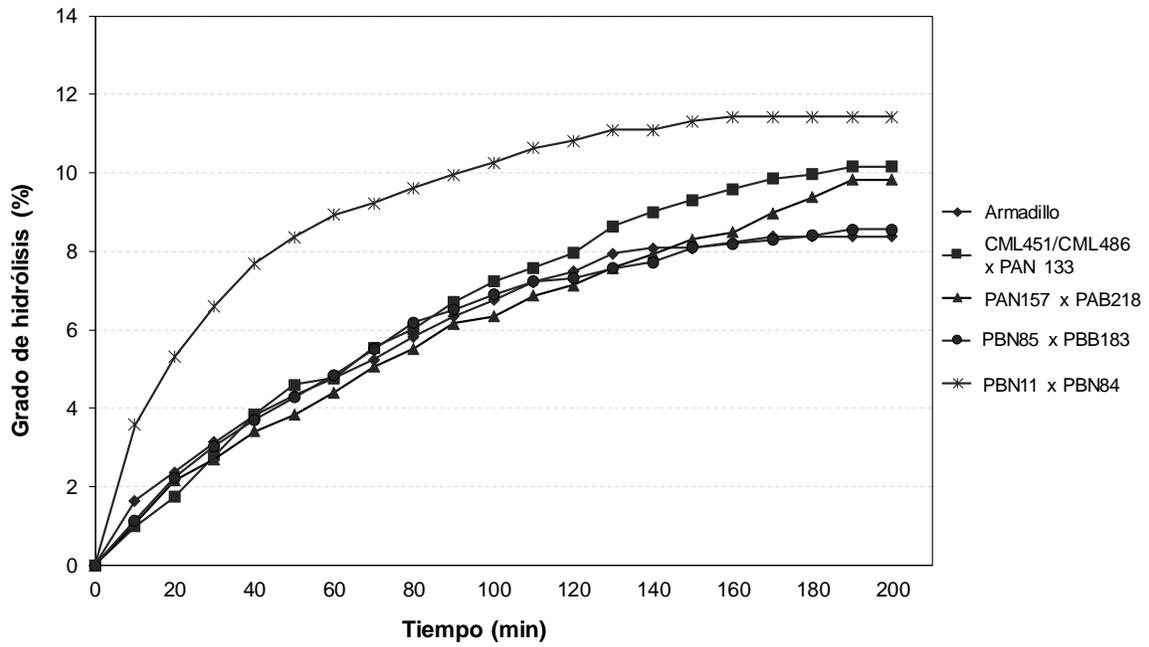


Figura 9. Grado de hidrólisis de prolaminas de maíces ACA tratadas con alcalasa

CML451/CML486 x PAN133 (10.17%). Estos valores son similares a los observados previamente por Kong y Xiong (2006) en hidrolizados de zeínas obtenidos con alcalasa. Sin embargo, Tang y Zhuang (2014) hidrolizaron zeínas con 4 diferentes proteasas y alcalasa presentó el mayor valor de GH (26.3%), el cual es superior a lo obtenido en el presente estudio. Estas discrepancias podrían atribuirse a diferencias en el genotipo, la extracción de las proteínas y las condiciones de reacción, entre otros.

2 Rendimiento de los hidrolizados de las fracciones proteicas

Se observó una variación significativa en el rendimiento de los hidrolizados de albúminas (49.2-68.9%), globulinas (75.2-94.3%) y prolaminas (73.3-88.4%) (**Cuadro 7**). El GH y el rendimiento presentaron una correlación positiva en los hidrolizados de albúminas ($r=0.65$, $p=0.009$) y globulinas ($r=0.52$, $p=0.048$). El maíz CML451/CML486 x PAN133 presentó rendimientos y GH altos en ambas fracciones, este comportamiento no fue observado para prolaminas, en donde a pesar de tener rendimientos altos se observaron GH bajos. En general, los valores observados son superiores al rendimiento obtenido en hidrolizados de gluten de maíz con alcalasa (55%) (Hu y col 2022).

C ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE HIDROLIZADOS DE ALBÚMINAS, GLOBULINAS Y PROLAMINAS DE MAÍCES ACA

La actividad antioxidante (AAox) de una sustancia puede ser identificada con mayor precisión mediante la evaluación de la actividad de captación de radicales libres generados en sistemas oxidativos (Je y col 2007). Se reporta que las proteínas por sí

Cuadro 7. Rendimiento de hidrolizados de albúminas, globulinas y prolaminas de maíces ACA y un maíz híbrido comercial

Muestras	Albúminas (%)	Globulinas (%)	Prolaminas (%)
Armadillo	52.54 ± 6.27 ^b	88.77 ± 0.45 ^{ab}	82.74 ± 1.55 ^{ab}
CML451/CML486 x PAN133	68.02 ± 1.22 ^a	94.28 ± 4.78 ^{ab}	79.10 ± 3.46 ^{bc}
PAN157 x PAB218	54.22 ± 2.81 ^b	72.54 ± 1.53 ^d	73.25 ± 5.22 ^c
PBN85 x PBB183	68.90 ± 3.43 ^a	83.46 ± 1.15 ^{bc}	88.85 ± 3.05 ^{ab}
PBN11 x PBN84	49.23 ± 1.20 ^b	81.88 ± 6.55 ^c	83.38 ± 7.91 ^{ab}

Letras diferentes por columna indican diferencia significativa por la prueba de Fisher ($p \leq 0.05$).

solas, en su forma nativa, presentan AAox debido a que inactivan las especies reactivas de oxígeno (ROS), pero los péptidos presentan mayor actividad (Samaranayaka y Li-Chan 2011).

1 DPPH

La AAox por DPPH de las albúminas, globulinas y prolaminas, así como sus hidrolizados se muestran en el **Cuadro 8**. En general, la mayoría de los hidrolizados presentaron mayor AAox con respecto a las fracciones de proteína. La fracción de hidrolizados de albúminas fue la que tuvo mayor AAox con respecto a globulinas y prolaminas. Un comportamiento similar fue observado por Félix-Medina y col (2023), quienes reportaron un porcentaje de inhibición del radical DPPH mayor en hidrolizados con alcalasa de la fracción de no-zeínas (30.74%) con respecto a la fracción de zeínas (26.75%) en maíz comercial.

Los valores de inhibición del radical DPPH de albúminas oscilaron entre 41.63% y 51.47%, siendo los maíces PBN11 x PBN84 (51.47%) y CML451/CML486 x PAN133 (49.19%) los que presentaron los valores más altos, mientras que el híbrido comercial fue el que presentó el menor valor (41.63%) (**Cuadro 8**). Estos valores correspondieron con el GH observado para estos materiales. En relación con la fracción de globulinas, todos los hidrolizados presentaron mayor AAox con respecto a la proteína. En este caso el hidrolizado del híbrido comercial presentó la mayor inhibición del radical DPPH (37.41%), seguido de CML451/CML482 x PAN133 (33.03%) (**Cuadro 8**). Quintero-Soto y col (2021) evaluaron la AAox por DPPH en hidrolizados de albúminas (Alb) y globulinas (Glb) de garbanzo obtenidos con alcalasa,

Cuadro 8. Actividad antioxidante de proteína e hidrolizados de albúminas, globulinas y prolaminas por el método DPPH

Muestra	Albúminas		Globulinas		Prolaminas	
	Proteína	Hidrolizado	Proteína	Hidrolizado	Proteína	Hidrolizado
Armadillo	31.01 ± 0.2 ^a (3.42 ± 0.03)	41.63 ± 0.38 ^c (4.49 ± 0.05)	25.56 ± 2.8 ^a (2.69 ± 0.23)	37.41 ± 1.9 ^a (4.30 ± 0.22)	25.44 ± 3.8 ^c (2.66 ± 0.76)	25.61 ± 0.9 ^d (2.99 ± 0.09)
CML451/CML486 x PAN133	12.86 ± 0.7 ^{bc} (1.17 ± 0.09)	49.19 ± 2.0 ^a (5.37 ± 0.23)	20.77 ± 0.6 ^b (2.15 ± 0.09)	33.03 ± 0.7 ^b (3.82 ± 0.08)	39.50 ± 0.4 ^b (4.64 ± 0.05)	21.61 ± 1.1 ^e (2.53 ± 0.12)
PAN157 x PAB218	11.58 ± 0.9 ^c (1.01 ± 0.76)	46.06 ± 0.2 ^b (5.01 ± 0.03)	8.27 ± 1.2 ^c (0.78 ± 0.03)	26.34 ± 1.1 ^c (3.05 ± 0.12)	28.80 ± 3.1 ^c (3.14 ± 0.44)	36.74 ± 1.9 ^b (4.28 ± 0.23)
PBN85 x PBB183	14.35 ± 0.8 ^b (1.35 ± 0.10)	45.92 ± 1.5 ^b (4.99 ± 0.18)	23.74 ± 0.7 ^{ab} (2.48 ± 0.10)	31.85 ± 1.4 ^b (3.68 ± 0.16)	45.78 ± 3.7 ^a (5.53 ± 0.52)	44.57 ± 1.9 ^a (5.18 ± 0.21)
PBN11 x PBN84	29.71 ± 2.9 ^a (3.26 ± 0.37)	51.47 ± 1.5 ^a (5.64 ± 0.17)	21.24 ± 2.0 ^b (2.21 ± 0.37)	26.41 ± 2.1 ^c (3.06 ± 0.23)	29.34 ± 2.0 ^c (3.21 ± 0.02)	32.31 ± 0.9 ^c (3.77 ± 0.11)

Tanto la proteína soluble como los hidrolizados fueron evaluados a 5 mg de proteína soluble/mL. Los resultados se reportaron como % Inhibición y (µmol ET/g H bs) respectivamente. Letras diferentes en la misma columna indican

reportando valores de inhibición que oscilaron entre 23 y 53% (Alb) y de 23.2 a 27.6% (Glb) en diferentes genotipos, lo que coincide con los valores observados en el presente estudio para ambas fracciones.

El comportamiento observado para AAox en los hidrolizados derivados de prolaminas fue muy diferente al observado en albúminas y globulinas, ya que no hubo diferencias considerables entre la actividad de la proteína con respecto a su hidrolizado (**Cuadro 8**). Los valores de AAox de los hidrolizados de prolaminas variaron de 21.61% a 44.57%, los cuales caen dentro del rango obtenido por Tang y col (2010) en hidrolizados de zeínas purificadas de harina de gluten de maíz y evaluados a 1 mg/mL (12.8%) y 10 mg/mL (46%). Por su parte, Jin y col (2016) reportaron una inhibición del radical DPPH de 46.55% en hidrolizados de harina de gluten de maíz (5 mg/mL) obtenidos con alcalasa.

2 ABTS

La AAox por ABTS de todos los hidrolizados fue mayor a la observada en proteína (**Cuadro 9**). Los mayores valores de actividad se observaron en hidrolizados de la fracción prolaminas, destacando la inhibición del radical ABTS de los maíces ACA PBN11 x PBN84 (68.38%) y PAN157 x PAB218 (65.40%), mientras que en el híbrido comercial fue de un 59.68%. Los valores de AAox del presente estudio corresponden con los valores reportados previamente por otros autores en hidrolizados de zeínas con alcalasa (59.44-64.3%) (Tang y col 2010; Zhuang y col 2013), y se encuentran por arriba de lo reportado por Zhu y col (2008) en hidrolizados de zeínas (122.8 $\mu\text{mol ET/g}$) evaluados a 1 mg/mL.

Cuadro 9. Actividad antioxidante de proteína e hidrolizados de albúminas, globulinas y prolaminas por el método

ABTS

Muestra	Albúminas		Globulinas		Prolaminas	
	Proteína	Hidrolizado	Proteína	Hidrolizado	Proteína	Hidrolizado
Armadillo	21.98 ± 0.5 ^b (104.38 ± 6.7)	26.43 ± 1.5 ^b (140.51 ± 7.2)	19.92 ± 0.16 ^{cd} (92.05 ± 6.56)	50.05 ± 2.4 ^b (260.79 ± 12.5)	20.58 ± 1.6 ^a (111.31 ± 6.3)	59.68 ± 0.4 ^c (302.68 ± 2.4)
CML451/CML486 x PAN133	16.20 ± 0.4 ^{cd} (71.31 ± 3.9)	27.34 ± 0.2 ^b (144.98 ± 1.0)	17.66 ± 2.20 ^d (78.51 ± 6.12)	36.52 ± 2.8 ^c (190.10 ± 14.5)	20.29 ± 0.9 ^a (110.07 ± 4.4)	59.23 ± 1.8 ^c (300.41 ± 8.9)
PAN157 x PAB218	18.13 ± 0.40 ^c (78.03 ± 1.9)	26.77 ± 0.5 ^b (142.19 ± 2.8)	28.19 ± 1.60 ^a (136.42 ± 2.02)	57.34 ± 2.5 ^a (298.91 ± 13.1)	17.66 ± 0.7 ^{bc} (97.91 ± 1.2)	65.40 ± 0.1 ^b (331.20 ± 0.3)
PBN85 x PBB183	14.45 ± 1.3 ^d (63.62 ± 2.5)	24.84 ± 0.4 ^c (132.66 ± 1.8)	21.12 ± 0.56 ^{bc} (100.48 ± 2.71)	52.34 ± 3.9 ^b (272.79 ± 20.5)	18.48 ± 0.9 ^{ab} (102.16 ± 3.5)	55.98 ± 0.5 ^d (284.25 ± 2.6)
PBN11 x PBN84	24.41 ± 1.9 ^a (113.06 ± 8.5)	28.87 ± 0.3 ^a (152.53 ± 1.6)	22.98 ± 2.29 ^b (109.28 ± 5.66)	49.87 ± 1.2 ^b (259.87 ± 6.4)	16.07 ± 1.6 ^c (90.92 ± 7.7)	68.38 ± 1.5 ^a (346.09 ± 7.3)

Tanto la proteína soluble como los hidrolizados fueron evaluados a 1 mg de proteína soluble/mL. Los resultados se reportaron como % Inhibición y (µmol ET/g H bs) respectivamente. Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa por la prueba de Fisher ($p \leq 0.05$).

El porcentaje de inhibición del radical ABTS de globulinas en los maíces ACA varió en un rango de 36.52% a 57.34% (**Cuadro 9**). El menor porcentaje de inhibición lo presentó el maíz CML451/CML486 x PAN133 (36.52%), mientras que el valor más alto se observó en PAN157 x PAB218 (57.34%). Por otro lado, en los hidrolizados de albúminas se observaron valores más bajos de AAox con un rango de 24.84% (PBN85 x PBB183) a 28.87% (PBN11 x PBN84) (**Cuadro 9**). Son pocos los estudios de AAox por ABTS en hidrolizados de globulinas y albúminas. En germen de maíz, fracción mayoritaria en albúminas y globulinas, los hidrolizados obtenidos con alcalasa, flavourzima y tripsina (2.5 mg/mL) presentaron valores de 220 a 267 $\mu\text{mol ET/g}$ (Karimi y col 2020), los cuales son inferiores a los observados en el presente estudio en la fracción de globulinas (**Cuadro 9**) tomando en cuenta que los autores usaron una concentración 2.5 veces más alta. Por otro lado, se reportó un 38.34% de inhibición del radical ABTS en hidrolizados de no-zeínas de maíz normal obtenidos con alcalasa y evaluados a 1 mg/mL (Félix-Medina y col 2023). Cabe destacar que las no-zeínas comprenden a las albúminas, globulinas y glutelinas, por lo que el valor obtenido por estos autores corresponde aproximadamente al promedio obtenido entre albúminas y globulinas en el presente estudio (**Cuadro 9**).

3 ORAC

La AAox por ORAC de las fracciones de proteínas e hidrolizados mostró un comportamiento diferente al observado por DPPH pero similar al de ABTS. En general los hidrolizados de prolaminas presentaron una mayor AAox con respecto a los de albúminas y globulinas (**Cuadro 10**). Los valores de AAox en los hidrolizados de prolaminas oscilaron entre 582.01 $\mu\text{mol ET/g H}$ (CML451/CML486 x PAN133) y 714.28

Cuadro 10. Actividad antioxidante de proteína e hidrolizados de albúminas, globulinas y prolaminas por el método ORAC

Muestra	Albúminas		Globulina		Prolaminas	
	Proteína	Hidrolizado	Proteína	Hidrolizado	Proteína	Hidrolizado
Armadillo	62.91 ± 4.64 ^{ab}	68.57 ± 0.52 ^b	170.48 ± 5.08 ^a	199.77 ± 12.36 ^c	346.67 ± 39.38 ^d	651.32 ± 10.53 ^c
CML451/CML486 x PAN133	68.15 ± 2.78 ^a	76.87 ± 2.60 ^a	80.78 ± 11.45 ^b	145.09 ± 7.19 ^d	440.27 ± 29.08 ^a	582.01 ± 2.59 ^e
PAN157 x PAB218	50.50 ± 6.4 ^c	66.27 ± 4.50 ^b	186.88 ± 16.55 ^a	338.35 ± 23.50 ^a	387.14 ± 22.86 ^{bc}	694.83 ± 1.16 ^b
PBN85 x PBB183	34.33 ± 4.04	56.05 ± 3.77 ^c	177.91 ± 1.54 ^a	254.73 ± 4.37 ^b	436.65 ± 34.20 ^{ab}	634.71 ± 8.20 ^d
PBN11 x PBN84	58.86 ± 4.78 ^b	64.05 ± 2.01 ^b	182.03 ± 0.37 ^a	252.95 ± 8.91 ^b	384.67 ± 11.14 ^{bc}	714.28 ± 6.21 ^a

Tanto la proteína soluble como los hidrolizados fueron evaluados a 1 mg de proteína soluble/mL. Los resultados se reportaron como $\mu\text{mol ET/g H bs}$. Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa por la prueba de Fisher ($p \leq 0.05$).

$\mu\text{mol ET/g H}$ (PBN11 x PABN84). Con respecto a la AAox de los hidrolizados de globulinas, el maíz ACA más sobresaliente fue PAN157 x PAB218 ($338.35 \mu\text{mol ET/g H bs}$), mientras que los valores más bajos se observaron en CML451/CML486 x PAN133 (145.09) y el híbrido comercial ($199.77 \mu\text{mol ET/g H bs}$). En ambas fracciones el maíz que presentó los menores valores fue CML451/CML486 x PAN133. Los hidrolizados de globulinas y prolaminas presentaron en promedio una AAox por ORAC de 3 a 9 veces más alta con respecto a los hidrolizados de albúminas ($64.05-76.87 \mu\text{mol ET/g}$). Ortíz-Martínez y col (2017b), observaron mayor AAox en hidrolizados de prolaminas y globulinas obtenidos con alcalasa con respecto a los obtenidos a partir de albúminas en maíz QPM.

Zhou y col (2012) evaluaron la AAox por ORAC en hidrolizados de un concentrado de proteínas de maíz comercial obtenidos a partir de tres proteasas (proteasa neutra, proteasa validasa[®] y proteasa alcalina), observando un rango de 65.6 a $191.4 \mu\text{mol ET/g}$ en las fracciones de hidrolizados. Los autores reportaron además que las fracciones de hidrolizados <10 kDa presentaron mayor AAox con respecto a los >10 kDa.

D CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE OBSERVADA EN LOS HIDROLIZADOS DE MAÍCES ACA

Los métodos de determinación de la AAox se basan en comprobar como un agente antioxidante inhibe la presencia de radicales libres. Esta inhibición es proporcional a la AAox del compuesto o la muestra, donde existen ensayos que se basan en la cuantificación de los productos formados tras el proceso oxidativo.

Los antioxidantes reaccionan con los radicales libres por diferentes mecanismos: transferencia de átomos de hidrógeno (HAT), transferencia de un solo electrón (SET) o la combinación de ambos mecanismos. En el primer caso, el radical libre elimina un átomo de hidrógeno del antioxidante que se convierte en un radical. En el mecanismo SET, el antioxidante proporciona un electrón al radical libre y luego se convierte en un catión radical. El mecanismo está determinado por la estructura y solubilidad del antioxidante y la polaridad del solvente. En la mayoría de las situaciones los dos mecanismos pueden ocurrir simultáneamente. En relación con los métodos utilizados en el presente estudio, se han reportado comportamientos diferentes, donde el método puede ocurrir en condiciones HAT o SET de acuerdo a la solubilidad del antioxidante, la polaridad del solvente y el tipo de muestra a evaluar (Schaich y col 2015). En el caso particular de ABTS y DPPH pueden actuar bajo un mecanismo “mixto” (HAT/SET), mientras que ORAC se ha reportado principalmente bajo un mecanismo HAT (Liang y Kitts 2014; Schaich y col 2015; Munteanu y Apetrei 2021).

En los ensayos ORAC y ABTS se observó en general una tendencia similar, en donde la AAox de los hidrolizados mostró el siguiente orden descendente: Pro>Glb>Alb, mientras que por DPPH el orden de AAox fue Alb>Glb>Pro. En el caso de los hidrolizados de prolaminas se ha reportado que el método ABTS resulta más efectivo, mientras que en el ensayo de DPPH no se obtuvieron buenos resultados (Zhu y col 2008). Esto corresponde con lo encontrado en el presente estudio, donde los hidrolizados de prolaminas presentaron una AAox considerablemente mayor por ABTS con respecto a lo observado por DPPH.

De acuerdo con uno de los mecanismos de acción propuestos para el ensayo de DPPH (SET), se ha reportado que aminoácidos aromáticos como el triptófano, tirosina, fenilalanina e histidina tienen alta AAox sobre radicales libres (Sánchez-Mendoza y col 2017). Sin embargo, las zeínas son deficientes en lisina (Lys) y triptófano (Trp), teniendo el endospermo pequeñas cantidades de estos aminoácidos esenciales (Shewry y Halford 2002), mientras que las albúminas son ricas en tales aminoácidos (Díaz-Gómez y col 2017). En este sentido, se puede concluir que los altos valores de AAox por DPPH de los hidrolizados de Alb, en comparación con las demás fracciones (Pro y G1b) pudiera deberse a la presencia de Lys y Trp en la secuencia de aminoácidos de los péptidos.

Wang y col (2015a) reportaron la actividad antiradical DPPH y ABTS del péptido QQPQPW del hidrolizado de proteína de maíz, concluyendo que esta se debe a la presencia de triptófano en su secuencia. La diferencia entre la capacidad de captación de radicales DPPH y ABTS podría deberse, en gran medida, a la diferencia de solubilidad y difusividad de los radicales en el medio de reacción, puesto que la eliminación de radicales libres por el método de DPPH suele usarse para conocer el papel de los antioxidantes hidrofóbicos donde suelen disolverse en medios alcohólicos, no en una solución acuosa, mientras que ABTS se utiliza para compuestos hidrofílicos e hidrofóbicos (Tang y col 2010).

Se ha demostrado en ciertos cereales como el trigo que la presencia de triptófano o tirosina en el C-terminal de los péptidos influye en la eliminación de radicales ABTS (Zhu y col 2008; Esfandi y col 2019). Zheng y col (2016) indicaron que la presencia de

residuos de aminoácidos antioxidantes (Tyr, Trp y Cys) en la secuencia es el factor determinante para la actividad de los dipéptidos durante la eliminación del radical ABTS. Además, los autores revelaron que los dipéptidos que contenían residuos Tyr/Trp en el extremo N-terminal mostraron AAox más fuerte que si estos se encontraban en el extremo C-terminal. Se ha reportado que el grupo hidroxilo (-OH) de la estructura fenólica en Tyr y el grupo indólico -NH en Trp sirven como donadores de hidrógeno y/o electrones, mientras que la Cys dona el hidrógeno tiol (SH) y Met es propenso a la oxidación a sulfóxido de Met (Hernández-Ledesma y col 2005). Mirzaee y col (2023) analizaron el contenido y composición de aminoácidos en gluten de maíz e hidrolizados, observando un aumento en general en el contenido de aminoácidos hidrofílicos en los hidrolizados en comparación con la proteína nativa.

En un estudio realizado por Zheng y col (2016) con el ensayo de ORAC indicaron que la eliminación de ROO• se presentaba principalmente en péptidos con Tyr, Trp, Cys y Met. Así mismo, reportaron que los aminoácidos como Lys, Phe, Pro, His, Ala, Leu, Glu y/o Asp también podrían servir como donadores de hidrógeno y actuar de esta manera como antioxidantes con alta actividad inhibitoria de radicales libres (He y col 2012; Saadi y col 2015). Por lo tanto, la mayor AAox observada en prolaminas por ORAC pudiera atribuirse a la abundancia de Glu, Phe, Leu, Pro y Ala que posee esta fracción y que podrían presentarse en la mayoría de los péptidos derivados de la misma. De manera similar los péptidos derivados de globulinas podrían ser abundantes en aminoácidos como Arg, Gly y Thr y podrían favorecer una alta AAox (Landry y Moureaux 1980; Wilson 1987; Larkins 2019).

Los altos valores de AAox obtenidos por los métodos ABTS y ORAC en las fracciones de globulinas y prolaminas pudieran estar influenciados por la hidrofobicidad de los aminoácidos, así como su mecanismo, observando como en 3 de los 4 maíces ACA, ambas fracciones presentaron los valores más altos contra el maíz comercial. Los resultados obtenidos demuestran la capacidad de la enzima alcalasa para producir péptidos con alta AAox. Sin embargo, se requiere conocer el perfil de los hidrolizados para conocer los posibles péptidos responsables de dicha actividad.

E INHIBICIÓN DE α -GLUCOSIDASA DE HIDROLIZADOS DE ALBÚMINAS, GLOBULINAS Y PROLAMINAS EN MAÍCES ACA

La actividad inhibitoria de α -glucosidasa *in vitro* de los hidrolizados de albúminas, globulinas y prolaminas se muestra en el **Cuadro 11**. El maíz ACA más sobresaliente fue CML451/CML486 x PAN133, cuyos hidrolizados presentaron los valores más altos de inhibición de α -glucosidasa en todas las fracciones. De manera general, los hidrolizados de albúminas (34.09-68.15%) presentaron porcentajes de inhibición más altos con respecto a globulinas (20.33-58.59%) y prolaminas (29.61-58.71%). Un comportamiento similar fue observado por Félix-Medina y col (2023), quienes registraron una mayor actividad inhibitoria en hidrolizados de no-zeínas (40.13%) con respecto a los hidrolizados de zeínas (36.15%), ambos tratados con alcalasa. La α -glucosidasa es una enzima clave en la digestión del almidón, ya que convierte los fragmentos de almidón producidos por la α -amilasa en glucosa. Por lo tanto, bloquear la acción de esta enzima puede efectivamente reducir el impacto de los alimentos con

Cuadro 11. Actividad inhibitoria de α -glucosidasa de hidrolizados de albúminas, globulinas y prolaminas

Muestra	Albúminas	Globulinas	Prolaminas
Armadillo	42.83 \pm 0.53 ^b	48.53 \pm 0.84 ^b	30.07 \pm 1.67 ^b
CML451/CML486 x PAN133	68.15 \pm 1.56 ^a	58.59 \pm 2.35 ^a	58.71 \pm 3.22 ^a
PAN157 x PAB218	44.05 \pm 2.52 ^b	20.33 \pm 0.80 ^d	29.61 \pm 1.69 ^b
PBN85 x PBB183	34.09 \pm 4.29 ^c	57.37 \pm 0.59 ^a	31.91 \pm 2.07 ^b
PBN11 x PBN84	42.56 \pm 1.41 ^b	41.52 \pm 0.26 ^c	33.10 \pm 4.13 ^b

Las fracciones de albúminas, globulinas y prolaminas fueron evaluadas a 66 mg/mL, 99 mg/mL y 33 mg/mL, respectivamente. Los valores están expresados como % de inhibición y corresponden a la media \pm desviación estándar de tres mediciones independientes. Letras diferentes indican diferencias significativas por la prueba de Fisher ($p \leq 0.05$).

almidón en el nivel posprandial de azúcar en sangre en diabéticos. Existen pocos reportes sobre el potencial antidiabético de hidrolizados obtenidos de las diferentes fracciones de proteínas en cereales. En salvado de arroz se ha reportado una mayor actividad inhibitoria de α -glucosidasa en hidrolizados de albúminas (52.43%) con respecto al resto de las fracciones proteínicas (25.84-45.26%) (Uraipong y Zhao 2017).

Por otro lado, en hidrolizados de germen de maíz obtenidos con alcalasa, flavourzima y tripsina se registraron valores de 12.8 a 37.1% de actividad inhibitoria de α -glucosidasa (20 mg/mL), los péptidos generados se encontraron compuestos principalmente por aminoácidos con grupos hidroxilo (Ser, Thr y Tyr), o aminoácidos básicos (Lys y Arg) en el extremo amino de los péptidos, que podrían desempeñar un papel fundamental en la inhibición de la α -glucosidasa, encontrándose mayormente Lys y Ser (Karimi y col 2020).

Mirzaee y col (2023) evaluaron la actividad inhibitoria de α -glucosidasa de hidrolizados de proteínas de maíz (CPH), soya (SPH) y mezclas de estas proteínas (SPH30:CPH70; SPH70:CPH30), observando una mayor actividad en los hidrolizados de soya (SPH, SPH70:CPH30) con respecto a los de maíz, lo que se relacionó con un mayor contenido de péptidos más pequeños producidos en la hidrólisis y la presencia de aminoácidos básicos (Lys, Arg) en el extremo de las cadenas peptídicas y de aminoácidos con grupos hidroxilo (Ser, Thr, Tyr), lo cual podría estar contribuyendo a la inhibición de la α -glucosidasa a través de la interacción con el sitio activo de la enzima (Karimi y col 2021).

Abbasi y col (2022) estudiaron el efecto inhibidor de α -glucosidasa de péptidos

bioactivos obtenidos a partir de proteína de quinoa hidrolizada con alcalasa y tripsina, en donde los péptidos con $PM \leq 3$ kDa obtenidos después de 0.5 h de hidrólisis con tripsina fue la fracción que mostró el mayor porcentaje de inhibición, lo que sugiere que la disminución del tamaño del péptido conduce a una mayor actividad inhibitoria de la enzima, probablemente con un mecanismo de inhibición competitiva.

Wang y col (2019) explicaron la relación entre la estructura y la actividad de péptidos de soya generados con alcalasa, donde la actividad inhibitoria de la α -glucosidasa estuvo fuertemente influenciada por dos aminoácidos hidrofóbicos: Pro y Leu, los cuales se consideraron aminoácidos vitales que tenían un efecto inhibitor contra la α -glucosidasa por separado o sinérgicamente. Posteriormente, Wang y col (2020) encontraron que el péptido LPLLR que contiene dos aminoácidos hidrofóbicos (Leu y Pro) y una Arg en su extremo C posee alta inhibición de la α -glucosidasa, considerándose estos tres aminoácidos vitales para tal actividad. Esto fue validado posteriormente por Zhang y col (2023), al identificar los péptidos con alta capacidad inhibitoria de α -glucosidasa en las secuencias LLVLYYEY y LLLLPSYSEF, las cuales contenían altos niveles de Leu. Así mismo, Liu y col (2021) observaron que la secuencia peptídica KVIISAPSKDAPMF, con lisina en el extremo inicial del N-terminal y fenilalanina al final del C-terminal, presentó una excelente actividad inhibitoria de la α -glucosidasa, atribuyéndole además esta actividad a la presencia de una alanina, una prolina y un residuo de metionina presentes en el extremo C-terminal, lo cual trajo consigo una mayor actividad.

Aún se desconoce el mecanismo exacto por el cual los péptidos podrían inhibir la actividad de la α -glucosidasa, aunque algunos de ellos ejercen su actividad inhibitoria

uniéndose al sitio activo de la enzima a través de interacciones hidrofóbicas (Bharatham y col 2008). Análisis de acoplamiento molecular indicaron que la mayoría de las interacciones entre los péptidos y la enzima α -glucosidasa se deben a cuatro interacciones principales (enlaces de hidrógeno, interacciones hidrofóbicas, puentes salinos y apilamiento π (interacción aromática)), siendo los enlaces de hidrógeno y las interacciones hidrofóbicas los más importantes en la actividad inhibitoria de α -glucosidasa (Yang y col 2023).

Los resultados obtenidos demuestran el gran potencial hipoglucémico de los hidrolizados de maíces ACA, destacando el maíz ACA CML451/CML486 x PAN133 que fue el más sobresaliente en los hidrolizados obtenidos en las tres fracciones, por lo que es de gran interés realizar la purificación y fraccionamiento de los péptidos obtenidos por hidrólisis con alcalasa para verificar su contribución y asociación con la actividad inhibitoria de α -glucosidasa, información que podría identificar péptidos inhibidores para el tratamiento antidiabético.

F RELACIÓN ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS EVALUADAS EN LOS MAÍCES ACA

El análisis de componentes principales (PCA) mostró las similitudes y diferencias entre los genotipos de maíz (**Figura 10**). Dos componentes explicaron el 80.69% de la variación total observada en AAox, actividad inhibitoria de α -glucosidasa y GH. El primer componente (PC1, 43.78%) fue asociado principalmente con la actividad inhibitoria α -glucosidasa, mientras que el segundo (PC2, 36.73%) se asoció con la AAox (DPPH y ABTS).

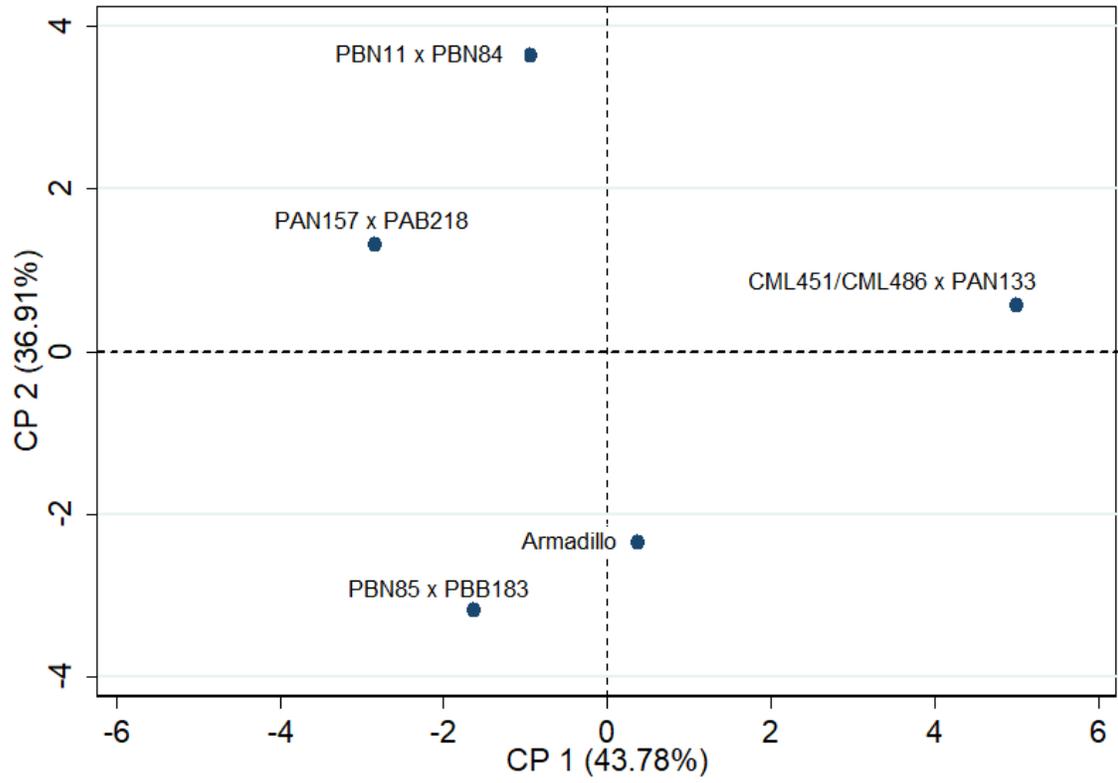


Figura 10. Análisis de componentes principales de maíces ACA y un híbrido comercial.

Como resultado del análisis de PCA, en el cuadrante superior derecho se ubicó al maíz CML451/CML486 x PAN133, el cual destacó por sus altos valores de AAox e inhibitoria de glucosidasa. En el cuadrante superior izquierdo se ubicaron los maíces PBN11 x PBN84 y PAN157 x PAB218, los cuales presentaron una mayor AAox en las fracciones de prolaminas y globulinas. Con base en este análisis, los maíces con las mejores características fueron CML451/CML486 x PAN133, PBN11 x PBN84 y PAN157 x PAB218.

IX. CONCLUSIONES

1. Los hidrolizados con alcalasa de la fracción albúminas presentaron mayores GH que los de las fracciones globulinas y prolaminas, lo cual corresponde con la mayor variabilidad de proteínas en esta fracción.
2. Los hidrolizados de albúminas presentaron mayor AAox por DPPH lo que podría asociarse con un mayor contenido de aminoácidos como Trp y Lys; mientras que, los hidrolizados de globulinas y prolaminas inhibieron mejor los radicales ABTS y ORAC, lo que podría asociarse con una mayor proporción en dichas fracciones de aminoácidos con alta AAox (Met, Arg, Leu, Trp, Pro, His).
3. El maíz ACA CML451/CML486 x PAN133 representa una buena fuente de péptidos con actividad inhibitoria de α -glucosidasa, lo que sugiere su uso potencial como parte de tratamientos no farmacológicos para coadyuvar en el tratamiento de la diabetes. Sin embargo, se requieren estudios *in vivo* para demostrar su potencial antidiabético.
4. Los resultados obtenidos demuestran la capacidad de la enzima alcalasa para producir péptidos de proteínas de maíz con alta AAox y actividad inhibitoria de α -glucosidasa. También demuestran que algunos de los maíces ACA evaluados poseen características nutracéuticas superiores al híbrido comercial, dándole valor agregado a estos materiales para su posible comercialización y consumo.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Abbasi S, Moslehisad M, Salami M. 2022. Antioxidant and alpha-glucosidase enzyme inhibitory properties of hydrolyzed protein and bioactive peptides of quinoa. *International Journal of Biological Macromolecules* 213:602-609. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.05.189>
- Abdel-Aal E-SM, Young JC, Rabalski I. 2006. Anthocyanin composition in black, blue, pink, purple, and red cereal grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54(13):4696-4704. <https://doi.org/10.1021/jf0606609>
- Acosta R. 2009. El cultivo del maíz, su origen y clasificación. *El maíz en Cuba. Cultivos Tropicales* 30(2).
- Acquah C, Dzuovor CKO, Tosh S, Agyei D. 2020. Anti-diabetic effects of bioactive peptides: recent advances and clinical implications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 62(8):2158-2171. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1851168>
- Adler-Nissen J. 1986. *Enzymic hydrolysis of food protein*. Elsevier Applied Science Publishers. 427 p.
- Angerhofer CK, Maes D, Giacomoni PU. 2009. The use of natural compounds and botanicals in the development of antiaging skin care products. En: Dayan N, editor. *Skin Aging Handbook*. Norwich, NY: William Andrew Publishing. p. 205-263.
- Ardisson-Korat AV, Willett WC, Hu FB. 2014. Diet, lifestyle, and genetic risk factors for type 2 diabetes: a review from the nurses' health study, nurses' health study 2, and health professionals' follow up study. *Current Nutrition Reports* 3(4):345-354. <https://doi.org/10.1007/s13668-014-0103-5>
- Arendt EK, Zannini E. 2013. Maizes. En: Arendt EK, Zannini E, editores. *Cereal grains for the food and beverage industries*. Woodhead Publishing, Technology and Nutrition. p. 67-113, 114e-115e.
- Atkinson AB, Robertson JIS. 1979. Captopril in the treatment of clinical hypertension and cardiac failure. *The Lancet* 314(8147):836-839. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(79\)92186-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(79)92186-X)

- Austrias MA. 2011. Historia e importancia del maíz. En: Ecológica A, editor. Maíz, de alimento sagrado a negocio del hambre. Ecuador. p. 9-20.
- Bailey CJ, Krentz AJ. 2010. Oral antidiabetic agents. En: Holt R, Cockram CS, Flyvbjerg A, Goldstein B, editores. Textbook of Diabetes. London. p. 452-477.
- Bhandari MR, Jong-Anurakkun N, Hong G, Kawabata J. 2008. α -Glucosidase and α -amylase inhibitory activities of nepalese medicinal herb Pakhanbhed (*Bergenia ciliata*, Haw). Food Chemistry 106(1):247-252. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.05.077>
- Bharatham K, Bharatham N, Park KH, Lee KW. 2008. Binding mode analyses and pharmacophore model development for sulfonamide chalcone derivatives, a new class of α -glucosidase inhibitors. Journal of Molecular Graphics and Modelling 26(8):1202-1212. <https://doi.org/10.1016/j.jmglm.2007.11.002>
- Bradford MM. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Analytical Biochemistry 72(1):248-254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Brand-Williams W, Cuvelier ME, Berset C. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie - Food Science and Technology 28(1):25-30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Brown R, Jarvis K, Hyland K. 1989. Protein measurement using bicinchoninic acid: Elimination of interfering substances. Analytical Biochemistry 180 (1):136-139 [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(89\)90101-2](https://doi.org/10.1016/0003-2697(89)90101-2)
- Campbell AP, Rains TM. 2014. Dietary protein is important in the practical management of prediabetes and type 2 diabetes. The Journal of Nutrition 145(1):164S-169S. <https://doi.org/10.3945.org/jn.114.194878>
- Chakrabarti S, Guha S, Majumder K. 2018. Food derived bioactive peptides in human health: Challenges and opportunities. Nutrients 10(11):1738. <https://doi.org/10.3390/nu10111738>
- Clare D, Swaisgood H. 2000. Bioactive milk peptides: A prospectus. Journal of Dairy Science 83(6):1187-1195. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)74983-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)74983-6)

- Cuevas-Mejía JdJ. 2014. Maíz: Alimento fundamental en las tradiciones y costumbres mexicanas. PASOS. Revista de Turismo y Patrimonio Cultural 12(2):425-432. <https://doi.org/10.25145/j.pasos.2014.12.030>
- Delucchi C, Percibaldi M, Trejo M, Eyhérbide G. 2019. Mejoramiento genético del perfil de ácidos grasos del aceite de maíz. Revista de Investigaciones Agropecuarias [serie en línea]. 45(2):159-181. Disponible en <https://www.redalyc.org/jatsRepo/864/86460707001/html/index.html>
- Díaz-Gómez JL, Castorena-Torres F, Preciado-Ortiz RE, García-Lara S. 2017. Anti-cancer activity of maize bioactive peptides. Frontiers in Chemistry 5:2296-2646. <https://doi.org/10.3389/fchem.2017.00044>
- Dudley J, Clark D, Rocheford TR, LeDeaux JR. 2007. Genetic analysis of corn kernel chemical composition in the random mated 7 generation of the cross of generations 70 of IHPx ILP. Crop Science 47(1):45-57. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.03.0207>
- Dudley JW, Lambert RJ. 1992. Ninety generations of selections for oil protein in maize. Maydica 37:1-7.
- EncicloVida. 2015. Maíz. *Zea mays* México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Disponible en <https://enciclovida.mx/especies/176079-zea-mays>.
- Esfandi R, Walters ME, Tsopmo A. 2019. Antioxidant properties and potential mechanisms of hydrolyzed proteins and peptides from cereals. Heliyon 5(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01538>
- Espinosa-Pardo FA, Savoie R, Subra-Paternault P, Harscoat-Schiavo C. 2020. Oil and protein recovery from corn germ: Extraction yield, composition and protein functionality. Food and Bioprocess Processing 120:131-142. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.01.002>
- Estrada BC, Corona AO, Martínez VAV, Grajales GS, Acuña SG. 2008. Selección recurrente para incrementar el contenido de aceite en maíz comiteco. Revista fitotecnica mexicana 31(3):5-8.

- FAO. 1993. El maíz en la nutrición humana. En: FAO, editor. Composición química y valor nutricional del maíz. Roma, Italia
- FAOSTAT. 2023. Food and Agriculture Organization Statistical Database. Disponible en <http://faostat.fao.org>. Consultado el 4 Marzo 2023.
- Félix-Medina JV, Sepúlveda-Haro AG, Quintero-Soto MF. 2023. Stability of antioxidant and hypoglycemic activities of peptide fractions of Maize (*Zea mays* L.) under different processes. Journal of Food Measurement and Characterization 17(1):362-370. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01618-5>
- Han R, Hernández Álvarez AJ, Maycock J, Murray BS, Boesch C. 2021. Comparison of alcalase and pepsin treated oilseed protein hydrolysates. Experimental validation of predicted antioxidant, antihypertensive and antidiabetic properties. Current research in food science 4:141-149. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.03.001>
- He R, Ju X, Yuan J, Wang L, Girgih AT, Aluko RE. 2012. Antioxidant activities of rapeseed peptides produced by solid state fermentation. Food Research International 49(1):432-438. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.08.023>
- Hernández-Ledesma B, Dávalos A, Bartolomé B, Amigo L. 2005. Preparation of antioxidant enzymatic hydrolysates from α -lactalbumin and β -lactoglobulin. identification of active peptides by HPLC-MS/MS. Journal of Agricultural and Food Chemistry 53(3):588-593. <https://doi.org/10.1021/jf048626m>
- Hernández-Ledesma B, Hsieh CC, de Lumen BO. 2009. Antioxidant and anti-inflammatory properties of cancer preventive peptide lunasin in RAW 264.7 macrophages. Biochemical and Biophysical Research Communications 390(3):803-808. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2009.10.053>
- Herrera-Chalé F, Betancur-Ancona D, Segura-Campos MR. 2014. Compuestos bioactivos de la dieta con potencial en la prevención de patologías relacionadas con sobrepeso y obesidad: péptidos biológicamente activos. Nutrición Hospitalaria 29(1):10-20. <https://doi.org/10.3305/nh.2014.29.1.6990>
- Higuchi N, Hira T, Yamada N, Hara H. 2013. Oral administration of corn zein hydrolysate stimulates GLP-1 and GIP secretion and improves glucose

- tolerance in male normal rats and goto-kakizaki rats. *Endocrinology* 154(9):3089-3098. <https://doi.org/10.1210/en.2012-2275>
- Hira T, Mochida T, Miyashita K, Hara H. 2009. GLP-1 secretion is enhanced directly in the ileum but indirectly in the duodenum by a newly identified potent stimulator, zein hydrolysate, in rats. *The American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology* 297(4):G663-671. <https://doi.org/10.1152/ajpgi.90635.2008>
- Hong F, Ming L, Yi S, Zhanxia L, Yongquan W, Chi L. 2008. The antihypertensive effect of peptides: A novel alternative to drugs? *Peptides* 29(6):1062-1071. <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2008.02.005>
- Hu R, Xu J, Qi G, Wang W, Sun XS, Li Y. 2022. Antioxidative hydrolysates from corn gluten meal may effectively reduce lipid oxidation and inhibit HepG2 cancer cell growth. *Journal of Agriculture and Food Research* 7:100252. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100252>
- Huang S, Adams WR, Zhou Q, Malloy KP, Voyles DA, Anthony J, A KJ, Petri JB, Messing JW. 2004. Isolation and sequence of a gene encoding and methionine-rich 10-kDa zein protein from maize. *Gene* 71 359-370. [https://doi.org/10.1016/0378-1119\(88\)90053-4](https://doi.org/10.1016/0378-1119(88)90053-4)
- Ibrahim MA, Bester MJ, Neitz AW, Gaspar ARM. 2018. Rational *in silico* design of novel α -glucosidase inhibitory peptides and *in vitro* evaluation of promising candidates. *Biomedicine & Pharmacotherapy* 107:234-242. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2018.07.163>
- Inglett GE, Blessin CW. 1979. Food applications of corn germ protein products. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 56(3):479-481. <https://doi.org/10.1007/BF02671550>
- INIFAP. 2017. Agenda técnica agrícola. Sinaloa. Ciudad de México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Jia J, Ma H, Zhao W, Wang Z, Tian W, Luo L, He R. 2010. The use of ultrasound for enzymatic preparation of ACE-inhibitory peptides from wheat germ protein. *Food Chemistry* 119(1):336-342. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.06.036>

- Jin DX, Liu XL, Zheng XQ, Wang XJ, He JF. 2016. Preparation of antioxidative corn protein hydrolysates, purification and evaluation of three novel corn antioxidant peptides. *Food Chemistry* 204:427-436. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.02.119>
- Karimi A, Ahmadi Gavlighi H, Amini Sarteshnizi R, Udenigwe CC. 2021. Effect of maize germ protein hydrolysate addition on digestion, *in vitro* antioxidant activity and quality characteristics of bread. *Journal of Cereal Science* 97:103148. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103148>
- Karimi A, Azizi MH, Ahmadi Gavlighi H. 2020. Fractionation of hydrolysate from corn germ protein by ultrafiltration: *In vitro* antidiabetic and antioxidant activity. *Food Science & Nutrition* 8(5):2395-2405. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1529>
- Kato-Yamakake TA, Mapes Sánchez C, Mera Ovando LM, Serratos Hernández JA. 2009. El maíz. Aspectos biológicos En: Universidad Nacional Autónoma de México C, editor. Origen y diversificación del maíz: una revisión analítica. México. p. 115.
- Kim M, Kim E, Kwak H, Jeong Y. 2014. The ingredients in saengshik, a formulated health food, inhibited the activity of alpha-amylase and alpha-glucosidase as anti-diabetic function. *Nutrition Research and Practice* 8(5):602-606. <https://doi.org/10.4162/nrp.2014.8.5.602>
- Kong B, Xiong YL. 2006. Antioxidant activity of zein hydrolysates in a liposome system and the possible mode of action. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54:6059-6068. <https://doi.org/10.1021/jf060632q>
- Konrad B, Anna D, Marek S, Marta P, Aleksandra Z, Józefa C. 2014. The evaluation of dipeptidyl peptidase (DPP)-IV, α -glucosidase and angiotensin converting enzyme (ACE) inhibitory activities of whey proteins hydrolyzed with serine protease isolated from asian pumpkin (*Cucurbita ficifolia*). *International Journal of Peptide Research and Therapeutics* 20(4):483-491. <https://doi.org/10.1007/s10989-014-9413-0>

- Kristinsson HG, Rasco BA. 2000. Fish protein hydrolysates: Production, biochemical, and functional properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 40(1):43-81. <https://doi.org/10.1080/10408690091189266>
- Kriz AL. 1989. Characterization of embryo globulins encoded by the maize Glb genes. *Biochemical Genetics* 27:239-251. <https://doi.org/10.1007/BF02401804>
- Kumar-Vasal S. 2001. High quality protein corn. En: Hallauer AR, editor. *Specialty Corns*. 2nd ed. United States America: CRC Press LLC. p. 83-129.
- Lambert RJ. 2001. High oil corn hybrids. En: Hallauer AR, editor. *Specialty corns 2ed*. United States America: CRC Press LLC. p. 129-153.
- Lambert RJ, Alexander DE, Han ZJ. 1998. A high oil pollinator enhancement of kernel oil and effects on grain yields of maize hybrids. *Journal argonomy* 90(2):211-215. <https://doi.org/10.2134/agronj1998.00021962009000020016x>
- Landry J, Moureaux T. 1980. Distribution and amino acid composition of protein groups located in different histological parts of maize grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 28(6):1186-1191 <https://doi.org/10.1021/jf60232a042>
- Larkins BA. 2019. Proteins of the kernel. En: Serna-Saldivar SO, editor. *Corn. Chemistry and Technology*. 3 ed. Oxford: AACC International Press. p. 319-336.
- Lavoie JL, Sigmund CD. 2003. Minireview: overview of the renin-angiotensin system an endocrine and paracrine system. *Endocrinology* 144(6):2179-2183. <https://doi.org/10.1210/en.2003-0150>
- Lee BD, Kim DF, Leet SJ. 2001. Nutritive and economic values of high oil corn in layer diet. *Poultry Science* 80:1527-1534. <https://doi.org/10.1093/ps/80.11.1527>
- Lee SJ, Cheong SH, Kim YS, Hwang JW, Kwon HJ, Kang SH, Moon SH, Jeon BT, Park PJ. 2013. Antioxidant activity of a novel synthetic hexa-peptide derived from an enzymatic hydrolysate of duck skin by-products. *Food and Chemical Toxicology* 62:276-280. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2013.08.054>
- Li J. 1997. Analysis of quality characters of maize germplasm resource. *Journal of Hebei Agricultural University* 20(1):12-16.

- Li XX, Han LJ, Chen LJ. 2008. *In vitro* antioxidant activity of protein hydrolysates prepared from corn gluten meal. *Journal Science Food Agriculture* 88(9):1660-1666. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3264>
- Liang N, Kitts D. 2014. Antioxidant property of coffee components: Assessment of methods that define mechanisms of action. *Molecules (Basel, Switzerland)* 19:19180-19208. <https://doi.org/10.3390/molecules191119180>
- Lin F, Chen L, Liang R, Zhang Z, Wang J, Cai M, Li Y. 2011. Pilot-scale production of low molecular weight peptides from corn wet milling byproducts and the antihypertensive effects *in vivo* and *in vitro*. *Food Chemistry* 124(3):801-807. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.06.099>
- Linné Cv, Lars S. 1753. *Species plantarum: exhibentes plantas rite cognitatas, and genera relatas*. Holmiae ed.: Impensis Laurentii Salvii.
- Liu IM, Tzeng TF, Liou SS, Chang CJ. 2011. *Angelica acutiloba* root alleviates advanced glycation end product mediated renal injury in streptozotocin diabetic rats. *Journal of Food Science* 76(7):H165-H174. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02310.x>
- Liu L, Chen J, Li X. 2021. Novel peptides with α -glucosidase inhibitory activity from *Changii Radix* hydrolysates. *Process Biochemistry* 111:200-206. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.08.019>
- Liu X, Zheng X, Song Z, Liu X, Kopparapu Nk, Wang X, Zheng Y. 2015. Preparation of enzymatic pretreated corn gluten meal hydrolysate and *in vivo* evaluation of its antioxidant activity. *Journal of Functional Foods* 18:1147-1157. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.10.013>
- Londoño-Londoño J. 2012. Antioxidantes: Importancia biológica y métodos para medir su actividad. En: Garcés L, editor. *Desarrollo y Transversalidad*. Medellín, Colombia: Corporación Universitaria Lasallista. p. 129-162.
- López-Mazón S, García-Navarrete G, Ibarra-Gutiérrez B. 2012. El maíz (*Zea mays* L.) y la cultura maya. *Biotecnia*. p. 3-4

- Lv J, Nie ZK, Zhang JL, Liu FY, Wang ZZ, Ma ZL, He H. 2013. Corn peptides protect against thioacetamide induced hepatic fibrosis in rats. *Journal of medicinal food* 16(10):912-919. <https://doi.org/10.1089/jmf.2012.2626>
- Malumba P, Vanderghem C, Deroanne C, Béra F. 2008. Influence of drying temperature on the solubility, the purity of isolates and the electrophoretic patterns of corn proteins. *Food Chemistry* 111:564-572. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.04.030>
- Mejri L, Vásquez-Villanueva R, Hassouna M, Marina ML, García MC. 2017. Identification of peptides with antioxidant and antihypertensive capacities by RP-HPLC-Q-TOF-MS in dry fermented camel sausages inoculated with different starter cultures and ripening times. *Food Research International* 100:708-716. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.072>
- Mirzaee H, Ahmadi Gavlighi H, Nikoo M, Udenigwe CC, Khodaiyan F. 2023. Relation of amino acid composition, hydrophobicity, and molecular weight with antidiabetic, antihypertensive, and antioxidant properties of mixtures of corn gluten and soy protein hydrolysates. *Food Science & Nutrition* 11(3):1257-1271. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3160>
- Mochida T, Hira T, Hara H. 2010. The corn protein, zein hydrolysate, administered into the ileum attenuates hyperglycemia via its dual action on glucagon-like peptide-1 secretion and dipeptidyl peptidase-IV activity in rats. *Endocrinology* 151(7):3095-3104. <https://doi.org/10.1210/en.2009-1510>
- Moose SP, Dudley JW, Rocheford TR. 2004. Maize selection passes the century mark: a unique resource for 21st century genomics. *Trends in Plant Science* 9(7):358-364. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2004.05.005>
- Mouzo D, Bernal J, López-Pedrouso M, Franco DA-O, Zapata CA-OX. 2018. Advances in the biology of seed and vegetative storage proteins based on two-dimensional electrophoresis coupled to mass spectrometry. *Molecules*:1420-3049. <https://doi.org/10.3390/molecules23102462>

- Munteanu IG, Apetrei C. 2021. Analytical methods used in determining antioxidant activity: A review. *International Journal of Molecular Sciences* [serie en línea]. 22(7). Disponible.
- Nakano D, Ogura K, Miyakoshi M, Ishii F, Kawanishi H, Kurumazuka D, Kwak CJ, Ikemura K, Takaoka M, Moriguchi S, Iino T, Kusumoto A, Asami S, Shibata H, Kiso Y, Matsumura Y. 2006. Antihypertensive effect of angiotensin I-converting enzyme inhibitory peptides from a sesame protein hydrolysate in spontaneously hypertensive rats. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry* 70(5):1118-1126. <https://doi.org/10.1271/bbb.70.1118>
- Nasri M. 2017. Protein hydrolysates and biopeptides: Production, biological activities, and applications in foods and health benefits. A review. En: Toldrá F, editor. *Advances in Food and Nutrition Research*. Academic Press. p. 109-159.
- Obaroakpo JU, Liu L, Zhang S, Lu J, Pang X, Lv J. 2019. α -Glucosidase and ACE dual inhibitory protein hydrolysates and peptide fractions of sprouted quinoa yoghurt beverages inoculated with *Lactobacillus casei*. *Food Chemistry* 299:124985. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.124985>
- Ortíz-Martínez M, Gonzalez de Mejía E, García-Lara S, Aguilar O, López-Castillo LM, Otero-Pappatheodorou JT. 2017a. Antiproliferative effect of peptide fractions isolated from a quality protein maize, a white hybrid maize, and their derived peptides on hepatocarcinoma human HepG2 cells. *Journal of Functional Foods* 34:36-48. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.04.015>
- Ortíz-Martínez M, Otero-Pappatheodorou JT, Serna-Saldívar SO, García-Lara S. 2017b. Antioxidant activity and characterization of protein fractions and hydrolysates from normal and quality protein maize kernels. *Journal of Cereal Science* 76:85-91. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.05.021>
- Paliwal RL. 2001. Introducción al maíz y su importancia. En: Organization FaA, editor. *El maíz en los trópicos: mejoramiento y producción*. Food and Agriculture Organization ed. Roma
- Papoutsis K, Zhang J, Bowyer MC, Brunton N, Gibney ER, Lyng J. 2021. Fruit, vegetables, and mushrooms for the preparation of extracts with α -amylase and

- α -glucosidase inhibition properties: A review. Food Chemistry 338:128119. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128119>
- Parris N, Moreau RA, Johnston DB, Singh V, Dickey LC. 2006. Protein distribution in commercial wet-and dry-milled corn germ. Journal of Agricultural and Food Chemistry 54(13):4868-4872 <https://doi.org/10.1021/jf060336d>.
- Preciado-Ortiz RE, García-Lara S, Ortiz-Islas S, Ortega-Corona A, Serna-Saldivar SO. 2013. Response of recurrent selection on yield, kernel oil content and fatty acid composition of subtropical maize populations. Field Crops Research 142:27-35. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.019>
- Preciado-Ortiz RE, Vázquez-Carrillo MG, Figueroa-Cárdenas JdD, Guzmán-Maldonado SH, Santiago-Ramos D, Topete-Betancourt A. 2018. Fatty acids and starch properties of high oil maize hybrids during nixtamalization and tortilla making process. Journal of Cereal Science 83:171-179. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.08.015>
- Preetha P, Devi VG, Rajamohan T. 2012. Hypoglycemic and antioxidant potential of coconut water in experimental diabetes. Food & Function 3(7):753-757. <http://dx.doi.org/10.1039/C2FO30066D>
- Puchalska P, Marina ML, García MC. 2012. Development of a reversed phase high performance liquid chromatography analytical methodology for the determination of antihypertensive peptides in maize crops. Journal of Chromatography A 1234:64-71. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2011.12.079>
- Quintanilla-García C, Zúñiga-Guajardo S. 2010. El efecto incretina y su participación en la diabetes mellitus tipo 2. Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social 48 (5) 509-520.
- Quintero-Soto MF, Chávez-Ontiveros J, Garzón-Tiznado JA, Salazar-Salas NY, Pineda-Hidalgo KV, Delgado-Vargas F, López-Valenzuela JA. 2021. Characterization of peptides with antioxidant activity and antidiabetic potential obtained from chickpea (*Cicer arietinum* L.) protein hydrolyzates. Journal of Food Science 86(7):2962-2977. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15778>

- Re R, Pellegrini N, Proteggente A, Pannala A, Yang M, Rice-Evans C. 1999. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine* 26(9):1231-1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Rojas de P E, Molina R, Rodríguez CU. 2012. Definición, clasificación y diagnóstico de la diabetes mellitus. En: *Metabolismo SVdEy*, editor. *Revista Venezolana de Endocrinología y Metabolismo*. p. 7-12.
- Rowe JB, Choct M, Pethick DW. 1999. Processing cereal grains for animal feeding. *Australian Journal of Agricultural Research* 50(5):721-736. <https://doi.org/10.1071/AR98163>
- Saadi S, Saari N, Anwar F, Abdul Hamid A, Ghazali HM. 2015. Recent advances in food biopeptides: Production, biological functionalities and therapeutic applications. *Biotechnology Advances* 33(1):80-116. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2014.12.003>
- Samaranayaka A, Li-Chan E. 2011. Food derived peptidic antioxidants: A review of their production, assessment, and potential applications. *Journal of Functional Foods* 3:229-254. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2011.05.006>
- Sánchez-Mendoza NA, Dávila-Ortiz G, Jiménez-Martínez C. 2017. Péptidos con actividad antioxidante provenientes de fuentes animales y vegetales. En: Ramírez-Ortiz ME, editor. *Propiedades funcionales de hoy*. México: OmniaScience. p. 117-135.
- Sánchez A, Vázquez A. 2017. Bioactive peptides: A review. *Food Quality and Safety* 1(1):29-46. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyx006>
- Schaich KM, Tian X, Xie J. 2015. Hurdles and pitfalls in measuring antioxidant efficacy: A critical evaluation of ABTS, DPPH, and ORAC assays. *Journal of Functional Foods* 14:111-125. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.01.043>
- Serna-Saldívar SO, Gutiérrez-Uribe JA, Mora-Rochin S, García-Lara S. 2013. Potencial nutraceutico de los maíces criollos y cambios durante el procesamiento tradicional y con extrusión *Revista fitotecnia mexicana* 36:295-304. <https://doi.org/10.35196/rfm.2013.3-S3-A.295>

- Shewry PR, Halford NG. 2002. Cereal seed storage proteins: structures, properties and role in grain utilization. *Journal of Experimental Botany* 53(370):947-958. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.370.947>
- SIACON. 2023. Sistema de informacion agroalimentarias de consultas. Modulo agricola estatal. Disponible en <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>. 4 Marzo 2023.
- Silva-Venancio S, Preciado-Ortíz R, Covarrubias-Prieto J, Ortíz-Islas S, Serna-Saldívar S, García-Lara S, Terrón-barrá AD, Rojas NP. 2019. Identification of superior doubled haploid maize (*Zea mays*) inbred lines derived from high oil content subtropical populations. *Maydica* 64(1):11.
- Singh N, Vasudev S, Yadava DK, Chaudhary DP, Prabhu KV. 2014. Oil improvement in maize: Potential and prospects. En: Springer, editor. *Maize: Nutrition Dynamics and Novel Uses*. New Delhi, India p. 77-82.
- Soares de Castro RJ, Sato HH. 2015. Biologically active peptides: Processes for their generation, purification and identification and applications as natural additives in the food and pharmaceutical industries. *Food Research International* 74:185-198. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.05.013>
- Sodek L, Wilson CM. 1971. Amino acid compositions of proteins isolated from normal, opaque-2, and flourey-2 corn endosperms by a modified Osborne procedure. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 19(6):1144-1150. <https://doi.org/10.1021/jf60178a011>
- Sohrabi M, Binaeizadeh MR, Irají A, Larijani B, Saeedi M, Mahdavi M. 2022. A review on α -glucosidase inhibitory activity of first row transition metal complexes: a futuristic strategy for treatment of type 2 diabetes. *The Royal Society of Chemistry Advances* 12(19):12011-12052. <https://doi.org/10.1039/D2RA00067A>
- Spínola V, Llorent-Martínez EJ, Castilho PC. 2019. Polyphenols of *Myrica faya* inhibit key enzymes linked to type II diabetes and obesity and formation of advanced glycation end-products (*in vitro*): Potential role in the prevention of diabetic

- complications. Food Research International 116:1229-1238. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.010>
- Tang N, Zhuang H. 2014. Evaluation of antioxidant activities of zein protein fractions. Journal of Food Science 79(11):C2174-C2184. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12686>
- Tang X, He Z, Dai Y, Xiong YL, Xie M, Chen J. 2010. Peptide fractionation and free radical scavenging activity of zein hydrolysate. Journal of Agricultural and Food Chemistry 58(1):587-593. <https://doi.org/10.1021/jf9028656>
- Taylor-Nuss E, Tanumihardjo S. 2010. Maize: A paramount staple crop in the context of global nutrition. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety 9:417-436. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2010.00117.x>
- Thomison PR, Geyer AB, Lotz LD, Siegrist HJ, Dobbels TL. 2003. TopCross high oil corn production. Agronomy Journal 95(1):147-154. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.1470>
- Tolman K, Chandramouli J. 2003. Hepatotoxicity of the thiazolidinediones. Clin Liver Dis 7(2):369-379. [https://doi.org/10.1016/S1089-3261\(03\)00020-5](https://doi.org/10.1016/S1089-3261(03)00020-5)
- Tomatsu M, Shimakage A, Shinbo M, Yamada S, Takahashi S. 2013. Novel angiotensin I converting enzyme inhibitory peptides derived from soya milk. Food Chemistry 136(2):612-616. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.08.080>
- Uraipong C, Zhao J. 2016. Rice bran protein hydrolysates exhibit strong *in vitro* α -amylase, β -glucosidase and ACE-inhibition activities. Journal of the Science of Food and Agriculture 96(4):1101-1110. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7182>
- Uraipong GC, Zhao J. 2017. *In vitro* digestion of rice bran proteins produces peptides with potent inhibitory effects on α -glucosidase and angiotensin I converting enzyme: Peptides from rice bran protein with potent bioactivities. Journal of the Science of Food and Agriculture 98:758-766. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8523>
- Valencia-Mejía E, Batista KA, Fernández JJA, Fernandes KF. 2019. Antihyperglycemic and hypoglycemic activity of naturally occurring peptides and protein hydrolysates from easy-to-cook and hard-to-cook beans (*Phaseolus vulgaris* L.).

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.03.043>

- Vázquez-Carrillo MG, Santiago-Ramos D, Gaytán-Martínez M, Morales-Sánchez E, Guerrero-Herrera MdJ. 2015. High oil content maize: Physical, thermal and rheological properties of grain, masa, and tortillas. *Lebensmitte-Wissenschaft & Technologie. Food Science and Technology* 60(1):156-161. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.07.043>
- Vioque J, Millán F. 2005. Los hidrolizados proteicos en alimentación: Suplementos alimenticios de gran calidad funcional y nutricional.2-8.
- Vioque J, Sánchez-Vioque R, Clemente A, Pedroche J, Bautista J, Millan F. 1999. Production and characterization of an extensive rapeseed protein hydrolysate. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 76(7):819-823. <https://doi.org/10.1007/s11746-999-0071-x>
- Wang H, Du Y-J, Song H-C. 2010. α -Glucosidase and α -amylase inhibitory activities of guava leaves. *Food Chemistry* 123(1):6-13. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.03.088>
- Wang J, Wu T, Fang L, Liu C, Liu X, Li H, Shi J, Li M, Min W. 2020. Anti-diabetic effect by walnut (*Juglans mandshurica* Maxim.)-derived peptide LPLLR through inhibiting α -glucosidase and α -amylase, and alleviating insulin resistance of hepatic HepG2 cells. *Journal of Functional Foods* 69:103944. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.103944>
- Wang L, Ding L, Wang Y, Zhang Y, Liu J. 2015a. Isolation and characterisation of *in vitro* and cellular free radical scavenging peptides from corn peptide fractions. *Molecules* 20(2):3221-3237. <https://doi.org/10.3390/molecules20023221>
- Wang L, Ding L, Yu Z, Zhang T, Ma S, Liu J. 2016. Intracellular ROS scavenging and antioxidant enzyme regulating capacities of corn gluten meal-derived antioxidant peptides in HepG2 cells. *Food Research International* 90:33-41. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.10.023>
- Wang R, Zhao H, Pan X, Orfila C, Lu W, Ma Y. 2019. Preparation of bioactive peptides with antidiabetic, antihypertensive, and antioxidant activities and identification of

- α -glucosidase inhibitory peptides from soy protein. *Food Science & Nutrition* 7(5):1848-1856. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1038>
- Wang X-j, Zheng X-q, Kopparapu N-k, Cong W-s, Deng Y-p, Sun X-j, Liu X-l. 2014. Purification and evaluation of a novel antioxidant peptide from corn protein hydrolysate. *Process Biochemistry* 49(9):1562-1569. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2014.05.014>
- Wang Y, Chen H, Wang X, Li S, Chen Z, Wang J, Liu W. 2015b. Isolation and identification of a novel peptide from zein with antioxidant and antihypertensive activities. *Food & Function* 6(12):3799-3806. <https://doi.org/10.1039/c5fo00815h>
- Wilson MC. 1987. Proteins of the kernel En: Watson SA RP, editor. *Corn: Chemistry and Technology*. American association of cereal chemists ed. St. Paul, Minnesota. p. 273-277.
- Winter FL. 1929. The mean and variability as affected by continuous selection for composition in corn. *Journal of Agricultural Research* 39(6):451-476.
- Yang X, Wang D, Dai Y, Zhao L, Wang W, Ding X. 2023. Identification and Molecular Binding Mechanism of Novel α -Glucosidase Inhibitory Peptides from Hot-Pressed Peanut Meal Protein Hydrolysates. *Foods* [serie en línea]. 12(3). Disponible.
- Yang Y, Tao G, Liu P, Liu J. 2007. Peptide with angiotensin I-converting enzyme inhibitory activity from hydrolyzed corn gluten meal. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 55(19):7891-7895. <https://doi.org/10.1021/jf0705670>
- Youle RJ, Anthony HCH. 1981. Occurrence of low molecular weight and high cysteine containing albumin storage proteins in oilseeds of diverse species. *American Journal of Botany* 68(1):44-48. <https://doi.org/10.2307/2442990>
- Zhang Y, Wu F, He ZA-O, Fang X, Liu X. 2023. Optimization and molecular mechanism of novel α -glucosidase inhibitory peptides derived from camellia seed cake through enzymatic hydrolysis. (2304-8158 (Print)). <https://doi.org/10.3390/alimentos12020393>

- Zheng L, Zhao Y, Dong H, Su G, Zhao M. 2016. Structure–activity relationship of antioxidant dipeptides: Dominant role of Tyr, Trp, Cys and Met residues. *Journal of Functional Foods* 21:485-496. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.12.003>
- Zheng XQ, Li LT, Liu XL, Wang XJ, Lin J, Li D. 2006. Production of hydrolysate with antioxidative activity by enzymatic hydrolysis of extruded corn gluten. *Applied Microbiology and Biotechnology* 73(4):763-770. <https://doi.org/10.1007/s00253-006-0537-9>
- Zhou C, Hu J, Ma H, Yu X, Owusu J, Ma H, Qin X. 2015. Antioxidant peptides from corn gluten meal: Orthogonal design evaluation. *Food Chemistry* 187:270-278. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.092>
- Zhou K, Sun S, Canning C. 2012. Production and functional characterisation of antioxidative hydrolysates from corn protein via enzymatic hydrolysis and ultrafiltration. *Food Chemistry* 135(3):1192-1197. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.05.063>
- Zhu L, Chen J, Tang X, Xiong YL. 2008. Reducing, radical scavenging, and chelation properties of *in vitro* digests of Alcalase-treated zein hydrolysate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56(8):2714-2721. <https://doi.org/10.1021/jf801328j>
- Zhuang H, Tang N, Dong S, Sun B, Liu J. 2013. Optimisation of antioxidant peptide preparation from corn gluten meal. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 93(13):3264-3270. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6170>

ABREVIATURAS

Abs	Absorbancia
ABTS	2, ácido 2'-Azino-Bis-3-Ethylbenzothiazoline-6-Sulfónico
ACA	Maíz con alto contenido en aceite
ADN	Ácido desoxirribonucleico
AGM	Ácido graso monoinsaturado
AGP	Ácido graso poliinsaturado
AGS	Ácido graso saturado
Ala	Alanina
Alb	Albúminas
AAox	Actividad antioxidante
APPH	2-2'-Azobis dihidrocloruro
Arg	Arginina
BCA	Ácido bicinconínico
bs	Base seca
BSA	Albúmina de suero bovino
Caco2	Células de adenocarcinoma de colon humano
CIMMYT	Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo
COO ⁻	Grupo carboxilo
CPH	Hidrolizados de proteínas de maíz
C-terminal	Carboxilo terminal
Cys	Cisteína

DM	Diabetes mellitus
DM2	Diabetes mellitus tipo 2
DPPH	2,2-di(4-tert-octilfenil)-1-picrilhidrazilo
DPP-IV	Dipeptidil peptidasa-IV
ECA	Enzima convertidora de angiotensina
ET/g	Equivalentes de trolox por gramo
EtOH	Etanol
FAO	Organización para la Agricultura y la Alimentación
FAOSTAT	Base de datos estadísticos corporativos de la Organización para la Agricultura y la Alimentación
FCC	Codex de productos químicos alimentarios
<i>g</i>	Fuerza centrífuga relativa
GH	Grado de hidrólisis
GIP	Péptido insulínotropico dependiente de glucosa
Glb	Globulinas
Gln	Glutamina
GLP-1	Péptido 1 similar al glucagón
HAT	Transferencia de átomos de hidrógeno
HepG2	Human Epidermoid carcinoma strain #2 (Células cancerosas epidermoides humanas)
His	Histidina
INIFAP	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

JECFA	Joint Expert Committee on Food Aditives (Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios).
kDa	Kilo dalton
Leu	Leucina
Lys	Lisina
M	Concentración molar
mbar	Milibar
Met	Metionina
mmol	Milimol
NaCl	Cloruro de sodio
NaOH	Hidróxido de sodio
-NH	Grupo indólico
NH ₂ -	Grupo amida
N-terminal	Amino terminal
-OH	Grupo hidroxilo
ORAC	Capacidad de absorción de radicales de oxígeno
p/v	Peso por volumen
PBS	Tampón de fosfato salino
PCA	Análisis de componentes principales
pH	Coefficiente de acidez y alcalinidad
PM	Peso molecular
Pro	Prolaminas

QPM	Maíz de calidad proteínica
RAS	Sistema renina-angiotensina
ROO•	Radical peroxilo
ROS	Especies reactivas de oxígeno
rpm	Revoluciones por minuto
Ser	Serina
SET	Transferencia de un solo electrón
SH	Grupo tiol
SIACON	Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta.
SPH	Hidrolizados de proteínas de soya
Thr	Treonina
Trp	Triptófano
Tyr	Tirosina
UA	Unidades Anson
UAS	Universidad Autónoma de Sinaloa
USA	Estados Unidos de América
v/v	Volumen-volumen
μmol	Micromol (s)