



**S.E.P. TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO  
de Tuxtepec**

**"Evaluación de la adición de antioxidantes al aceite de  
soya enriquecido con ácido linoleico conjugado para la  
elaboración de chips de plátano macho y yuca"**

**TESIS**

Para Obtener el título de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN ALIMENTOS**

PRESENTA

**I.B.Q. SAYRA LIZZETT VARGAS VILLALOBOS**

DIRECTORA:

**DRA. CECILIA EUGENIA MARTÍNEZ SANCHEZ**

CO-DIRECTOR:

**DR. JESÚS RODRIGUEZ MIRANDA**



MCA-2017/03

TUXTEPEC, OAXACA, FEBRERO 2017

## **COMITÉ TUTORIAL**

**DRA. CECILIA EUGENIA MARTÍNEZ SÁNCHEZ**

**DR. JESÚS RODRÍGUEZ MIRANDA**

**M.C. ERNESTINA PAZ GAMBOA**

**DRA. ROSELIS CARMONA GARCÍA**



S.E.P. TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

# INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTEPEC

## MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ALIMENTOS

**“Evaluación de la adición de antioxidantes al  
aceite de soya enriquecido con ácido linoleico  
conjugado para la elaboración de chips de  
plátano macho y yuca”**

### TESIS

Para Obtener el título de

**MAESTRO EN CIENCIAS EN ALIMENTOS**

PRESENTA

**IBQ. SAYRA LIZZETT VARGAS VILLALOBOS**

DIRECTOR

**DRA. CECILIA EUGENIA MARTÍNEZ SÁNCHEZ**

CO-DIRECTOR:

**DR. JESÚS RODRÍGUEZ MIRANDA**



Febrero, 2017.  
Tuxtepec, Oaxaca

MCA-2017/03



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
Instituto Tecnológico de Tuxtepec

"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA  
División de Estudios Profesionales

Procedimiento para la Titulación  
**Autorización de Presentación del Trabajo Profesional**  
Referencia a la Norma ISO 9001:2008 7.5.1

SUBDIRECCION ACADÉMICA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
EXPEDIENTE: DEP-ñ/17  
Tuxtepec, Oaxaca. **09/FEBRERO/2017**  
OFICIO: No. 0885

**IBQ. SAYRA LIZZETT VARGAS VILLALOBOS**  
**EGRESADA DE LA MAESTRÍA DE**  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ALIMENTOS**  
**CON NÚMERO DE CONTROL M09350053**  
**PRESENTE.**

POR MEDIO DE LA PRESENTE ME PERMITO COMUNICARLE QUE LA COMISIÓN REVISORA INTEGRADA POR LOS C.C. **DRA. CECILIA EUGENIA MARTÍNEZ SÁNCHEZ, DR. JESÚS RODRÍGUEZ MIRANDA, M.C. ERNESTINA PAZ GAMBOA Y DRA. ROSELIS CARMONA GARCÍA** REVISÓ Y APROBÓ EN SU TOTALIDAD EL TRABAJO PROFESIONAL DENOMINADO "EVALUACIÓN DE LA ADICIÓN DE ANTIOXIDANTES AL ACEITE DE SOYA ENRIQUECIDO CON ÁCIDO LINOLEICO CONJUGADO PARA LA ELABORACIÓN DE CHIPS DE PLÁTANO MACHO Y YUCA" PRESENTADO POR USTED COMO PRODUCTO DE TESIS DEL LINEAMIENTO DE TITULACIÓN CORRESPONDIENTE, PARA OBTENER EL TÍTULO DE **MAESTRA EN CIENCIAS EN ALIMENTOS**.

POR LO ANTERIOR Y DE ACUERDO A LOS LINEAMIENTOS INSTITUCIONALES, SE LE DA TRÁMITE LEGAL PARA QUE PROCEDA A LA PRESENTACIÓN DEL TRABAJO PROFESIONAL.

**ATENTAMENTE**  
"CIENCIA Y TÉCNICA PRESENTES AL FUTURO"

**M.E. JULIAN KURI MAR**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES.**

C.c.p.-Coord. de titulación  
JKM/has



Av. Dr. Victor Bravo C.P. 68350 Col. 5 de Mayo Tuxtepec, Oaxaca  
Teléfono: (287) 87 5 10 44 Ext. 103, Fax: (287) 87 5 10 80  
e-mail: [info@itlax.edu.mx](mailto:info@itlax.edu.mx)



REGISTRO SGC  
Codigo: ITTIA AC PO-008-09  
Revisión: 1  
Fecha de Autorización: 15 Junio 2014

Proceso Estándar Con Certificación a Nivel de Tercer Nivel  
Según la Norma ISO 9001:2008

## DEDICATORIA

A Dios por estar siempre conmigo permitiéndome cumplir con una meta más.

Con todo mi cariño y mi amor para las personas que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino se terminaba, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento. Papá y mamá. Alfredo y Rubí.

A mis hermanos Alfredo y Rubi por estar siempre presentes, acompañándome para poderme realizar y por ese ánimo y alegría que siempre infunden en mí.

Como una madre siempre la he visto, gracias a su sabiduría influyeron en mi la madurez para lograr todos mis objetivos en la vida, es para usted está tesis en agradecimiento por todo su amor. Gracias abuelita Clemen.

A una gran persona que conocí en los últimos semestres de mi carrera, y que aun así me deslumbra con su gran amor y apoyo incondicional... Ricardo mi esposo, porque siempre estuviste presente para brindarme tu ayuda.  
Con todo mi cariño está tesis te la dedico a ti, porque sé que siempre contaré contigo. Te amo.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca que me otorgo.

A la Dra. Cecilia Eugenia Martínez Sánchez mi director de tesis por confiar en mí, por su paciencia y por su apoyo en los momentos difíciles. Gracias a sus consejos y a su experiencia he aprendido demasiado.

A mi co-asesor el Dr. Jesús Rodríguez Miranda por su dirección, paciencia, entrega y valiosos consejos que me permitieron alcanzar los objetivos de esta tesis.

A mis sinodales MC. Ernestina Paz Gamboa, Dra. Roselis García Carmona, gracias por darme la oportunidad y por el tiempo que me han dedicado para leer este trabajo, a sus enseñanzas, observaciones y correcciones.

A mis compañeros y amigos de generación que han estado conmigo a lo largo de esta etapa.

Gracias a todos aquellos que no están aquí, pero que me ayudaron a que este gran esfuerzo se volviera realidad.

## RESUMEN

Vargas Villalobos Sayra Lizzett. M. C. en Alimentos. Instituto Tecnológico de Tuxtepec. Enero, 2017. **Evaluación de la adición de antioxidantes al aceite de soya enriquecido con ácido linoleico conjugado para la elaboración de chips de plátano macho y yuca.** Director (a): Dra. Cecilia Eugenia Martínez Sánchez, Co-director: Dr. Jesús Rodríguez Miranda.

El ácido linoleico conjugado (CLA, por sus siglas en inglés) ha demostrado efectos benéficos contra la carcinogénesis, arteriosclerosis, colesterol y grasa corporal. Dichas enfermedades están relacionadas con el elevado consumo de grasas saturadas. Los aceites vegetales contienen sustancias que evitan la autooxidación, pero sus concentraciones son bajas, siendo necesaria la adición de antioxidantes. El objetivo de la investigación fue evaluar la adición de un antioxidante (natural y sintético) sobre la estabilidad oxidativa y compuestos polifenólicos de chips modelo de plátano macho y yuca enriquecidas con ácido linoleico conjugado. Se obtuvo aceite de soya con CLA mediante fotoirradiación (144 h/22 °C) al cual se le adicionó el antioxidante (catequina o TBHQ) al 0.02% (p/p). Se elaboraron chips de plátano macho y yuca. Se cuantificó el contenido de CLA y se evaluó la estabilidad oxidativa mediante el índice de peróxidos, índice de *p*-anisidina, ácidos grasos libres y valor totox al aceite isomerizado antes y después del freído con y sin antioxidantes. A las chips se les determinó el índice de oscurecimiento (IO) y textura (punción). Al aceite se le cuantificó el contenido de tocoferoles y fitosteroles. Los resultados obtenidos han demostrado que un ciclo de freído no afecta el contenido del CLA en el aceite, ya que no existe diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) después del proceso de freído y en el contenido de CLA absorbido por las chips. El uso de los antioxidantes genera una disminución significativa ( $p < 0.05$ ) en el contenido de productos de oxidación primaria, secundaria y ácidos grasos libres. El aceite isomerizado con TBHQ no presentó diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) en los valores de índice de peróxidos, *p*-anisidina, ácidos grasos libres y valor totox durante los seis ciclos de freído, demostrando una mayor estabilidad, además de presentar el menor contenido de peróxidos (1.01 Meq/kg de muestra) y *p*-anisidina (2.76). Los resultados de IO y textura mostraron que el uso de aceite isomerizado con y sin antioxidantes no es un factor que afecte las características físicas de las chips. El contenido de tocoferoles y fitoesteroles no mostró diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) después del proceso de fotoisomerización y después de un ciclo de freído debido al uso de antioxidantes.

## ABSTRACT

Vargas Villalobos Sayra Lizzett. Masterin food Science. Instituto Tecnológico de Tuxtepec. January, 2017. **Evaluation of the addition of antioxidants to soybean oil enriched with conjugated linoleic acid for the production of male and cassava banana chips.** Director (a): Dra. Cecilia Eugenia Martínez Sánchez, Co-director: Dr. Jesús Rodríguez Miranda.

Conjugated linoleic acid (CLA) has shown beneficial effects against carcinogenesis, atherosclerosis, cholesterol and body fat. These diseases are related to the high consumption of saturated fats. Vegetable oils contain substances that prevent autoxidation, but their concentrations are low, being necessary the addition of antioxidants. The objective of this research was to evaluate the addition of an antioxidant (natural and synthetic) on the oxidative stability and polyphenolic compounds of model chips of plantain and cassava enriched with conjugated linoleic acid. Soybean oil with CLA was obtained by photoirradiation (144 h/22 °C) and antioxidant was added (catechin or TBHQ) at 0.02% (w/w). Chips of plantain and cassava were elaborated. CLA content was quantified and the oxidative stability was evaluated by the peroxide index, *p*-anisidine index, free fatty acids and totox value to the isomerized oil before and after frying with and without antioxidants. The chips were determined the Browning index (BI) and texture (puncture). The oil was quantified the content of tocopherols and phytosterols. The results obtained have shown that a frying cycle does not affect the CLA content in the oil, since there is no significant difference ( $p < 0.05$ ) after the frying process and in the content of CLA absorbed by the chips. The use of antioxidants generates a significant decrease ( $p < 0.05$ ) of primary oxidation products, secondary and free fatty acids content. The oil isomerized with TBHQ showed no significant difference ( $p < 0.05$ ) in the values of peroxide index, *p*-anisidine, free fatty acids and totox value during the six frying cycles, showing a higher stability, besides presenting the lowest content of peroxides (1.01 Meq / kg sample) and *p*-anisidine (2.76). The results of BI and texture showed that the use of isomerized oil with and without antioxidants is not a factor that affects the physical characteristics of the chips. The content of tocopherols and phytosterols did not show significant differences ( $p < 0.05$ ) after the photoisomerization process and after a frying cycle due to the use of antioxidants.

## CONTENIDO

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>DEDICATORIA</b> .....  | iii         |
| <b>AGRADECIMIENTOS</b> .....  | iv          |
| <b>RESUMEN</b> .....  | v           |
| <b>ABSTRACT</b> .....   | vi          |
| <b>CONTENIDO</b> .....  | vii         |
| Índice de figuras .....   | ix          |
| Índice de tablas .....  | x           |
| <b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....  | 11          |
| <b>II. MARCO TEÓRICO</b> .....  | 14          |
| 2.1 Ácido linoleico conjugado (CLA) .....   | 15          |
| 2.1.2 Producción de CLA .....   | 19          |
| 2.1.2.1 Producción de CLA por fotoisomerización del ácido linoleico (LA) en aceites vegetales ..... | 20          |
| 2.1.3 Estabilidad del CLA .....   | 22          |
| 2.2 Antioxidantes .....   | 22          |
| 2.2.1 Tocoferoles .....   | 24          |
| 2.2.2 Catequina .....   | 27          |
| 2.2.3 TBHQ (Butilhidroquinona terciaria) .....  | 28          |
| 2.3 Esteroles .....   | 29          |
| 2.3.1 Fitoesteroles .....   | 29          |
| 2.4 El plátano macho ( <i>Musa paradisiaca</i> AAB) .....   | 31          |
| 2.4.1 Composición del plátano macho .....   | 32          |
| 2.4.2 Usos del plátano macho .....  | 33          |
| 2.4.3 Producción mundial del plátano macho .....  | 33          |
| 2.4.4 Producción nacional del plátano macho .....   | 34          |
| 2.4.5 Producción municipal del plátano macho .....  | 34          |
| 2.5 Yuca ( <i>Manihot esculenta</i> Crantz) .....   | 35          |
| 2.5.1 Producción mundial de yuca .....  | 36          |
| 2.5.2 Producción de yuca en México .....  | 36          |
| 2.6 Freído .....  | 37          |
| 2.6.1 Tipos de freído .....   | 39          |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.6.2 Factores que afectan la penetración y la absorción de aceite en el alimento .....   | 41        |
| 2.6.3 Cambios químicos en el freído .....   | 43        |
| 2.6.4 Evolución de parámetros físicos durante el freído.....                              | 47        |
| 2.6.4.1 Contenido del aceite.....   | 47        |
| 2.6.4.2 Textura .....   | 48        |
| 2.6.4.3 Color.....  | 49        |
| 2.8 ANTECEDENTES .....  | 50        |
| 2.9 JUSTIFICACIÓN .....   | 51        |
| 2.10 OBJETIVOS .....  | 52        |
| 2.10.1 Objetivo general: .....  | 52        |
| 2.10.2 Objetivos específicos.....   | 52        |
| <b>III. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>   | <b>53</b> |
| 3.1 Materia prima .....   | 54        |
| 3.2 Obtención del aceite de soya enriquecido con CLA .....                                | 54        |
| 3.2.1 Proceso de absorción para la remoción de yodo .....                                 | 55        |
| 3.3 Adición de los antioxidantes al aceite fotoisomerizado .....                          | 55        |
| 3.4 Preparación de las chips modelo de plátano macho y yuca.....                          | 55        |
| 3.4.1 Pretratamiento de las chips de plátano macho y yuca .....                           | 55        |
| 3.4.2 Condiciones de freído para las chips de plátano macho y yuca.....                   | 56        |
| 3.5 Estabilidad oxidativa del aceite enriquecido .....                                    | 56        |
| 3.5.1 Índice de peróxidos .....   | 57        |
| 3.5.2 Índice de <i>p</i> -anisidina.....  | 57        |
| 3.5.3 Ácidos grasos libres .....  | 58        |
| 3.6 Análisis del color .....  | 59        |
| 3.7 Textura .....   | 59        |
| 3.8 Extracción del aceite .....   | 60        |
| 3.9 Determinación del perfil de ácidos grasos.....  | 60        |
| 3.10 Cuantificación de tocoferoles y fitoesteroles .....                                  | 61        |
| <b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>   | <b>62</b> |
| 4.1 Composición del aceite de soya enriquecido con CLA y de aceite extraído de chips..... | 63        |
| 4.2 Estabilidad oxidativa.....  | 65        |
| 4.2.1 Índice de peróxidos .....   | 65        |
| 4.2.2 Índice de <i>p</i> -anisidina.....  | 68        |

|  |    |
|--|----|
| 4.2.3 Ácidos grasos libres .....   | 70 |
| 4.2.4 Valor tottox .....   | 72 |
| 4.3 Pérdida de CLA después de un ciclo de freído .....                             | 74 |
| 4.4 Aceite y CLA absorbido por las chips .....                                     | 75 |
| 4.5 Índice de oscurecimiento (IO) de las chips .....                               | 79 |
| 4.6 Textura de las chips .....   | 81 |
| 4.7 Efecto de la fotoisomerización sobre la estabilidad de los tocoferoles .....   | 84 |
| 4.8 Efecto de la fotoisomerización sobre la estabilidad de los fitoesteroles ..... | 87 |
| <b>V. CONCLUSIONES</b> .....   | 90 |
| <b>VI. REFERENCIAS</b> .....   | 93 |

## Índice de figuras

| No. Figura | Nombre  | Pág. |
|------------|---|------|
| 1          | Estructura química del ácido linoleico y los isómeros principales del CLA (Chow, 2008).           | 15   |
| 2          | Estructura molecular de los tocoferoles (Navas, 2010)   | 26   |
| 3          | Plantación de la Finca Mundo Nuevo de Tuxtepec  | 35   |
| 4          | Cambios durante el freído (Badui, 2006)   | 43   |
| 5          | Diagrama de las tres fracciones de aceite durante el proceso de fritura                           | 47   |
| 6          | Escala Dole (Gallegos, 2012)  | 57   |
| 7          | Índice de peróxidos del aceite testigo e isomerizado con y sin antioxidantes después del freído   | 66   |
| 8          | Índice de p-Anisidina del aceite testigo e isomerizado con y sin antioxidantes después del freído | 69   |
| 9          | Ácidos grasos libres del aceite testigo e isomerizado con y sin antioxidantes después del freído  | 71   |
| 10         | Valor tottox del aceite testigo e isomerizado con y sin antioxidantes después del freído          | 73   |
| 11         | Valor tottox del aceite testigo e isomerizado con y sin antioxidantes después del freído          | 75   |
| 12         | Porcentaje de aceite absorbido por las chips  | 76   |
| 13         | Porcentaje de CLA absorbido en las chips de (a) plátano macho y (b) yuca                          | 78   |
| 14         | Índice de oscurecimiento en las chips de (a) plátano macho y (b) yuca                             | 80   |

|    |   |    |
|----|---|----|
| 15 | Fuerza de fractura de las chips de (a) plátano macho y (b) yuca                                   | 83 |
| 16 | Pérdida de tocoferoles en el aceite de soya sometido a fotoisomerización y a un ciclo de freído   | 86 |
| 17 | Pérdida de fitoesteroles en el aceite de soya sometido a fotoisomerización y a un ciclo de freído | 89 |

## Índice de tablas

| No. Tabla | Nombre   | Pág. |
|-----------|--|------|
| 1         | Efectos biológicos atribuidos al CLA                             | 17   |
| 2         | Principales tipos de grasas y aceites utilizados para la fritura | 40   |
| 3         | Perfil de ácidos grasos del aceite de soya (%)                   | 63   |
| 4         | Perfil de ácidos grasos del aceite extraído de las chips (%)     | 64   |
| 5         | Contenido de tocoferoles (mg/L) en el aceite de soya             | 85   |
| 6         | Contenido de fitoesteroles (mg/L) en el aceite de soya           | 88   |

## **I. INTRODUCCIÓN**

El ácido linoleico conjugado (CLA), es un ácido graso esencial el cual se encuentra de manera natural en los alimentos en pequeñas proporciones y es una mezcla de isómeros geométricos y posicionales caracterizado por dobles enlaces principalmente en las posiciones, 10 y 11, 10 y 12, ú 11 y 13; conteniendo los dos isómeros más importantes (*cis*-9, *trans*-11 y *trans*-10, *cis*-12) del ácido octadecadienoico (Botelho et al., 2008).

Dado que el CLA es un grupo de ácidos grasos esenciales, no puede ser sintetizado por el cuerpo humano, y por tanto debe ser ingerido en la alimentación. De manera natural, el CLA se encuentra presente en mayor proporción en los tejidos animales, predominantemente en el tejido graso de animales rumiantes o animales con un proceso digestivo fermentativo y puede ser obtenido por diferentes vías como la isomerización de ácido linoleico en presencia de un álcali, por vía bioquímica mediante el uso de cepas microbianas de diferentes géneros (*Bifidobacterium*, *Enterococcus* y *Lactobacillus*) o por la técnica de fotoisomerización con la cual se ha obtenido una eficiencia alta de conversión además de que puede ser utilizado una fuente de origen vegetal (Fritsche, 2000).

El ácido linoleico conjugado ha recibido especial atención debido a sus efectos benéficos a la salud como anticancerígeno, anti obesidad y su efecto positivo en la disminución del colesterol entre otros, pero debido a las concentraciones bajas que se encuentran en los alimentos incluidos en la dieta humana se ha visto en la necesidad de buscar nuevas alternativas para aumentar su consumo (Ip et al., 1991).

Una alternativa es utilizar un aceite enriquecido con ácido linoleico conjugado en procesos como el de freído, ya que en este proceso el aceite toma el lugar del agua en la matriz del alimento, además de que el aceite imparte buen sabor, excelente sensación de palatabilidad, color dorado o tostado y crujencia al alimento.

En la región de Tuxtepec existe una gran producción de plátano macho y yuca, el plátano macho es comercializado ampliamente como chips y la yuca muestra la posibilidad de ser comercializada de esta forma.

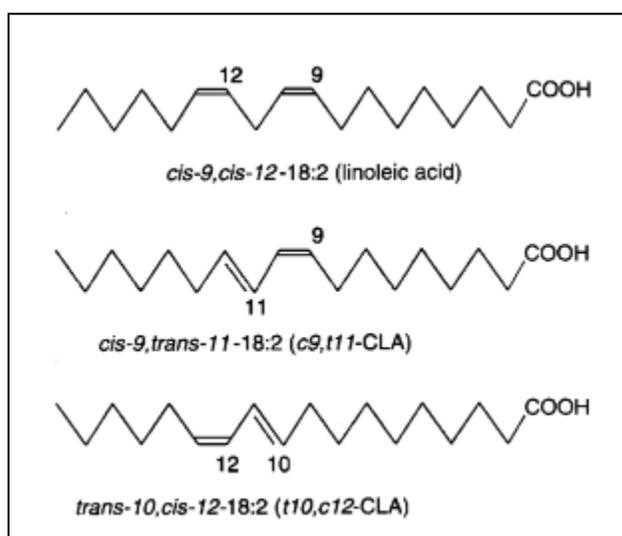
Por tales razones en el presente trabajo se realizará la fotoisomerización del aceite de soya para producir CLA y utilizar este aceite en la elaboración de chips tanto de plátano macho como de yuca, cuidando conservar las propiedades características del freído.

## **II. MARCO TEÓRICO**

## 2.1 Ácido linoleico conjugado (CLA)

El ácido linoleico conjugado (CLA), es un compuesto que se encuentra naturalmente en pequeñas cantidades en una gran variedad de alimentos, es un grupo de isómeros geométricos y de posición del ácido linoleico con dobles enlaces conjugados (Botelho et al., 2008).

El ácido linoleico conjugado (CLA), es un ácido graso esencial producido por la flora intestinal de los animales rumiantes. Se dice que es conjugado, porque ha sufrido algún cambio en su estructura molecular. Se han descrito 2 isómeros principales, el *cis-9, trans-11* y el *trans-10, cis-12*. La estructura de estos isómeros fue determinada por Ha, Grima y Pariza en 1987 (Zlatanos et al., 2002). En la figura 1 se muestran los isómeros de CLA, entre estos la configuración *9-cis, 11-trans* es la más abundante y biológicamente activa, pues se considera que representa entre el 80-90% del total de CLA, seguida por las configuraciones *7-trans, 9-cis* y *10-trans, 12-cis* (Fritsche, 2000).



**Figura 1.** Estructura química del ácido linoleico y los isómeros principales del CLA (Chow, 2008)

Las propiedades benéficas atribuidas al ácido linoleico conjugado han incrementado el interés en la obtención de este compuesto. Un amplio número de investigaciones que abarcan tanto el reconocimiento de sus propiedades benéficas como sus rutas de obtención y posible aplicación en alimentos han sido desarrolladas hasta el momento (Bisig et al., 2007).

Dado que el CLA es un grupo de ácidos grasos esenciales, no puede ser sintetizado por el cuerpo humano, y por tanto debe ser ingerido en la alimentación.

Sin embargo, en la actualidad son escasos los reportes que indican los valores reales de ingesta diaria de CLA en humanos y tanto las metodologías aplicadas para su medición como el periodo de tiempo en el que se han desarrollado los estudios son discutibles. Asimismo, la relación consumo-efecto benéfico en la salud no ha sido evaluada rigurosamente (Ritzenthaler et al., 2001).

Debido a los efectos benéficos a la salud el ácido linoleico conjugado ha recibido especial atención y se han realizado publicaciones en las que demuestran sus efectos como anticancerígeno (Pariza et al., 1985; Ha et al., 1990; Ip et al., 1991), anti arteriosclerosis, anti obesidad (Parodi, 1997) y su efecto positivo en la disminución del colesterol. En estudios adicionales (Ip et al., 1991) atribuyeron la reducción de la incidencia de cáncer mamario en ratas principalmente a la presencia del isómero 9-*cis*, 11-*trans* suministrado mediante dieta (Ip et al., 1991), resultados que fueron posteriormente corroborados tras encontrar reducción en la proliferación de tres líneas de cáncer en estudios realizados *in vitro* (Palombo, 2002).

En la Tabla siguiente se registran algunos de los beneficios del CLA reportados especificando su acción y tipo de estudio.

**Tabla 1.** Efectos biológicos atribuidos al CLA

| <b>Beneficio Reportado</b>    | <b>Acción Observada</b>                          | <b>Etapas de Estudio</b> |
|-------------------------------|--|--------------------------|
| Anti-cáncer                   | Inhibe el crecimiento de tumores                 | Animales                 |
|                               | Inhibe la proliferación de células cancerígenas  | Células                  |
|                               | Reduce la angiogénesis                           | Animales                 |
| Anti-arterioesclerosis        | Reduce la formación de placa                     | Animales                 |
|                               | Reduce la expresión de moléculas de adhesión     | Células                  |
|                               | Reduce la formación de citoquinas                | Animales                 |
| Anti-obesidad                 | Reduce la angiogénesis                           | Animales                 |
|                               | Reduce la deposición de grasas                   | Humanos/animales         |
| Modulación del sistema inmune | Reduce la diabetes                               | Animales                 |
|                               | Reduce la producción de citoquinas inflamatorias | Humanos/animales         |
|                               | Mejora la formación de anticuerpos               | Humanos/animales         |

Fuente: Wahle et al., 2004.

Los efectos del CLA sobre el sistema inmune se basan principalmente en el estímulo que ejerce en la síntesis de anticuerpos como las inmunoglobulinas A, G y M, las cuales ofrecen protección frente al ataque de patógenos invasores. Del mismo modo se asocia al CLA con la disminución significativa de los niveles de inmunoglobulina E, anticuerpo relacionado a la mayoría de las reacciones alérgicas; por lo que concluye que el CLA podría tener efectos favorables en la prevención y/o tratamiento de ciertas alergias alimentarias (Gnädig et al., 2003).

La ingesta diaria de CLA propuesta para suministrar efectos anticancerígenos en humanos aún no se encuentra bien definida.

La información sobre el posible efecto antioxidante atribuido al CLA es menos clara y más controversial que las acciones biológicas ya descritas. Dependiendo del modelo de estudio, es el efecto observado. En modelos *in vivo* el CLA produjo una disminución significativa de los niveles de peróxidos y de sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico, dos procedimientos analíticos utilizados para evaluar efectos de antioxidantes o inhibidores del estrés oxidativo (Pariza et al., 2001). Estudios realizados *in vitro*, han demostrado que el CLA posee una efectiva capacidad atrapadora de radicales libres pro-oxidantes, lo cual es atribuible a una actividad

antioxidante (Yu, 2001). El CLA ha sido considerado como un efectivo inhibidor del estrés oxidativo cuando se le comparó con los tocoferoles y con antioxidantes sintéticos como el butilhidroxitolueno (BHT), y en numerosas revisiones se mencionó su actividad antioxidante, comparable a la de los antioxidantes sintéticos convencionales (Devery et al., 2001). Sin embargo, aunque existe evidencia sobre los efectos antioxidantes del CLA la controversia deriva del hecho de que el ácido graso *in vitro* se oxidó con mayor velocidad que otros ácidos grasos de mayor poliinsaturación (eicosapentaenoico 20:5 y docosahexaenoico 22:6), por lo cual pudo atribuírsele al CLA un efecto pro-oxidante. Como se puede observar, esta es otra área de investigación sobre el CLA que requiere de mucho más información y exactitud en el desarrollo de los modelos de estudio y en la interpretación de los resultados.

El valor más bajo reportado es de 55 mg CLA/día, el cual fue obtenido teniendo en cuenta las dietas sugeridas para disminuir los riesgos de cáncer. Sin embargo, el trabajo realizado por Ip et al., (1994), logró demostrar la actividad biológica del isómero C18:2 *c9 t11* como agente anticarcinogénico, al suministrar a través de la dieta cantidades variables de CLA a ratones con carcinogénesis mamaria y medir su respuesta en la disminución de tumores. De los datos obtenidos en estos estudios un consumo promedio de 0.015 g CLA/día en ratones con una masa de 350 g presentó efectos positivos en la reducción de la incidencia tumoral carcinogénica (Ip et al., 1994). Estos resultados extrapolados a humanos con un peso corporal de 70 kg sugieren un consumo promedio de 3 g CLA/día para encontrar los mismos efectos benéficos en la prevención del cáncer. No obstante, estos resultados deben ser interpretados cautelosamente. Paralelamente, otros estudios han mostrado efectos benéficos en disminución de cáncer con ingestas de CLA diarias estimadas en 620 mg en hombres y 441 mg en mujeres (Ritzenthaler et al., 2001).

De manera natural, el CLA se encuentra presente en mayor proporción en los tejidos animales, predominantemente en el tejido graso de animales rumiantes o animales

con un proceso digestivo fermentativo cuya actividad ruminal está relacionada con una larga fermentación anaeróbica en la cual actúan microorganismos capaces de realizar la biohidrogenación de ácidos grasos poliinsaturados ingeridos en la alimentación. En este sentido, la mayor fuente de CLA la constituyen tanto la carne como los derivados lácteos provenientes de vacas, ovejas, cabras, etc., en niveles que varían desde 0.55 mg/g grasa a 9.12 mg/g grasa. Por lo tanto, hay una necesidad de fuentes concentradas de CLA que sean bajas en grasas saturadas y una forma de aumentar su ingesta es enriqueciendo alimentos con CLA utilizando diferentes vías.

### **2.1.2 Producción de CLA**

Los resultados presentados por los estudios en cuanto a los beneficios del CLA, han generado desarrollos encaminados hacia la producción más eficiente y práctica de este compuesto. En este sentido, los métodos de producción de CLA que han sido estudiados recientemente, comprenden tanto su producción vía metabólica en rumiantes a través del cambio de la dieta animal, incrementando el consumo de fuentes ricas en ácido linoleico (aceite de girasol, cártamo, maíz, soya algunas semillas como la de algodón), que influyen la formación de este compuesto en la cavidad ruminal (Rego et al., 2005). Las rutas metabólicas se presentan en dos etapas, la primera es la biohidrogenación del ácido linoleico por acción de la bacteria del rumen *Butyrivibrio fibrisolvens* encontrada también en las heces humanas y de ratas (Brown y Moore, 1960) y la segunda está relacionada con la conversión de ácido vacénico en la glándula mamaria, así como su obtención vía reacción química por isomerización de ácido linoleico, por la deshidratación del ácido ricinoleico, la isomerización alcalina en agua, la isomerización en etilenglicol y en propilenglicol así como la isomerización de mono alquil esterres o vía enzimática, e incluso su producción mediante fermentación microbiana (Kelly, 1998) con intervención de la ingeniería genética (Dunford, 2001).

Actualmente, el CLA como suplemento dietario es producido por la isomerización de ácido linoleico en condiciones alcalinas, reacción que genera diferentes co-productos transformándose en una mezcla de isómeros de los cuales no todos cuentan con efectos biológicos, siendo un proceso altamente costoso.

Se han realizado investigaciones acerca de los métodos de producción de CLA los cuales se han enfocado principalmente en la producción de mayores concentraciones de los isómeros de interés (18:2 *cis*-9, *trans*-11 y 18:2 *cis*-12, *trans*-10) y en la disminución de residuos de los solventes más utilizados (etilenglicol, dimetilsulfóxido, etc.) en el producto final debido a su toxicidad.

Se ha demostrado que la fotoisomerización del ácido linoleico en los aceites vegetales puede ser usada como método alternativo para la síntesis de ácido linoleico conjugado, el cual es producido en un alimento en comparación con los otros métodos, además que son complicados y requieren mucho tiempo.

#### **2.1.2.1 Producción de CLA por fotoisomerización del ácido linoleico (LA) en aceites vegetales**

La fotoisomerización es el comportamiento molecular en el que el cambio estructural entre isómeros es causado por fotoexcitación. Existen reacciones de fotoisomerización tanto reversibles como irreversibles. Sin embargo, la palabra "fotoisomerización" por lo general indica un proceso reversible.

El CLA puede ser sintetizado químicamente por la deshidratación del grupo hidroxil de los ácidos grasos mediante álcali o fotoisomerización de ácidos grasos insaturados en aceites ricos en ácido linoleico (Gangidi y Proctor, 2006). La fotoisomerización del aceite de soya, con yodo como catalizador en ausencia de solventes indicó que el CLA puede ser sintetizado de manera simple siendo más barato por fotocatalisis directa.

La ventaja de la técnica de fotoisomerización es que el CLA se produce en una fuente alimenticia, mientras que en los métodos anteriores, el CLA es producido como un ácido graso libre no comestible.

Los aceites vegetales que contienen cantidades apreciables de LA, como aceites de lino (linaza), girasol, maíz y de cártamo alto en oleico que están disponibles, pero no han sido evaluadas de manera extensa como fuente de aceite rica en CLA. Sin embargo, sólo el aceite de soya se ha utilizado para estudiar la fotoisomerización de aceite rico en LA.

Se propuso un sistema simple de irradiación en donde el aceite de soya fue irradiado en un matraz con una lámpara UV de 100 W a una distancia de 45 cm. Sin embargo, el gran periodo de exposición y bajos rendimientos limitaron el uso de esta técnica. Por tal motivo Jain y Proctor (2006) utilizaron un sistema de reacción en el cual obtuvieron un mayor rendimiento de CLA de aproximadamente 20% y llegaron a la conclusión que son 3 factores que se deben tomar en cuenta para una buena fotoisomerización. La distancia entre la fuente de irradiación y el aceite, la exposición uniforme a la luz acompañada por agitación del aceite durante la irradiación, y una concentración óptima de catalizador (0.15%).

La Fotoisomerización de LA en aceite de soya ha demostrado ser un método alternativo simple y eficaz de la síntesis de CLA que se puede completar a una escala de laboratorio usando una lámpara UV-visible con 0.15% de yodo como catalizador con un aparato estándar de la irradiación fotoquímica. Sin embargo, este método consume mucho tiempo, requiriendo 144 h para sintetizar 20% de CLA. Un método a escala piloto se ha desarrollado y optimizado por Jain et al., (2008) de manera que el aceite de soya rico en CLA puede ser producido a escala piloto con un rendimiento del 20% de CLA en 12 h. Esto requiere 0.35% (p/p) de catalizador de yodo y una unidad de sistema de iluminación personalizada de flujo laminar que consta de placas de vidrio de borosilicato y tres lámparas UV visibles de 450 W, para aumentar la exposición del aceite a la luz ultravioleta.

Esta modificación en la estructura del ácido linoleico por la fotoisomerización causa una inestabilidad en la oxidación del CLA. Yang et al., (2004) investigaron la oxidación de los diferentes isómeros de CLA mediante la comparación de los isómeros de manera individual; llegando a la conclusión de que los isómeros *trans* eran más estables, y que la estabilidad a la oxidación de CLA se ve más afectada por la configuración geométrica y la posición del doble enlace.

### **2.1.3 Estabilidad del CLA**

El enranciamiento del aceite y la oxidación son motivo de preocupación porque el CLA es un aceite poliinsaturado. Hay varios informes en donde el CLA exhibe actividad antioxidante. Ha et al., (1990) informó que el CLA fue más eficaz en la prevención de la oxidación del ácido linoleico que un tocoferol, y casi tan eficaz como BHT (Butil hidroxitolueno). Sin embargo, otros han encontrado que el CLA actúa como un prooxidante o como un antioxidante y puede variar entre las formas de CLA; Van den Berg et al., (1995) informó de que el CLA fue un prooxidante cuando una mezcla de CLA y LA se exponen al aire (Yetella et al., 2012).

La estabilidad oxidativa del CLA es un tema controvertido y no resuelto debido a los informes contradictorios con respecto a la estabilidad oxidativa del CLA y su capacidad antioxidante.

## **2.2 Antioxidantes**

Los antioxidantes son sustancias que pueden retrasar el comienzo o reducir la velocidad de oxidación de las sustancias autooxidables (Fennema, 1996).

En forma natural, hay sustancias que evitan la autooxidación, como la lecitina, los tocotrienoles y los tocoferoles (vitamina E), con peculiaridad de que el poder antioxidante de estos últimos es inverso al de su función biológica y que se encuentran en una concentración de 1150, 1000, 950, 600 y 100 ppm en los aceites crudos de soya, palma, algodón, maíz y oliva, respectivamente.

Los derivados fenólicos, como las isoflavonas (genisteína, daidzeína y gliciteína), los flavonoides como la epigallocatequina y los ácidos cafeico, clorogénico, ferúlico y cumárico, presentan estas propiedades. Estos ácidos son escasos en los aceites, excepto en el de oliva virgen (80 p.p.m), cuya presencia se supone es la razón de su alta estabilidad; el ácido cafeico muestra mayor protección que el propio BHT (Butil hidroxitolueno). Los extractos de especias, como clavo, romero, salvia, orégano y pimienta gorda presentan esta actividad, pero no se usan como tal por su intenso aroma y color.

Los flavonoides representan el grupo de polifenoles más ampliamente distribuido en las plantas, y en la actualidad, ya se han identificado más de 4000 compuestos diferentes. Los flavonoides pueden dividirse a su vez en diferentes subclases, siendo las más representativas: los flavonoles, flavonas, flavanonas, isoflavonas, antocianidinas y flavanoles (catequinas y proantocianidinas). Hay evidencias epidemiológicas convincentes que muestran los beneficios de los flavonoides en la salud y de su contribución en retardar algunos procesos degenerativos (Robards et al., 1999). Son compuestos con habilidad para atrapar radicales libres, quelar metales pesados y modular la actividad de ciertas enzimas, y además se ha observado que los flavonoides poseen propiedades anticancerígenas, cardiotónicas, antitrombóticas, vasculares, que disminuyen el colesterol y contribuyen a la protección del hígado, entre otras (Robards et al., 1999).

Los compuestos antes mencionados están en concentraciones bajas y su efectividad antioxidante es muy reducida, por lo que es preciso recurrir a sustancias sintéticas más potentes, aun cuando la hidrogenación parcial evita la autoxidación (Badui, 2006)

Los antioxidantes sintéticos son propiamente donadores de protones, como el butil hidroxianisol (hidroxianisol butilado, BHA), el butil hidroxitolueno (hidroxitolueno butilado, BHT), la 2,4,5-trihidroxibutirofenona (THBP), el 4-hidroximetil-2,6-ditertbutilfenol, la tertbutilhidroquinona (butilhidroquinona terciaria, TBHQ) y los

galatos; no detienen la formación de los radicales, sino que reaccionan con ellos, los estabilizan y producen radicales del antioxidante menos activos. Es decir, se consumen en la reacción y, por lo tanto, la estabilidad del lípido siempre va a depender de la cantidad residual.

El BHA (butil hidroxianisol) es en realidad una mezcla de dos isómeros, 2-BHA y 3-BHA, y por contener un solo hidroxilo, al igual que el BHT, es lipófilo, insoluble en agua y muy soluble en grasas y aceites; es muy efectivo para prevenir la oxidación de aceites esenciales y pigmentos liposolubles y a temperaturas elevadas desprende olores fenólicos. Por su parte, el BHT actúa mejor en grasas animales que en aceites vegetales.

En general, estos dos antioxidantes, BHA y BHT, no son muy activos en aceites vegetales refinados, sin embargo estos aceites vegetales contienen de manera natural tocotrienoles y tocoferoles (Badui, 2006). La actividad antioxidante de los tocoferoles, polifenoles y otros compuestos de los aceites vegetales, presenta un creciente interés desde que fueron relacionados con su carácter protector frente a enfermedades degenerativas crónicas como enfermedades coronarias, complicaciones cardiovasculares, algunos tipos de cáncer y estrés oxidativo (Varela, 2009); además de su contribución a la reducción de la peroxidación lipídica (Wagner et al., 2001) y actividad antihipertensiva (Perona et al., 2004).

### **2.2.1 Tocoferoles**

Los tocoferoles son antioxidantes naturales que retardan el enranciamiento y disminuyen el deterioro de la calidad industrial y comercial del aceite. A su vez, en el organismo actúan como Vitamina E retardando el envejecimiento celular (Bramley et al., 2000).

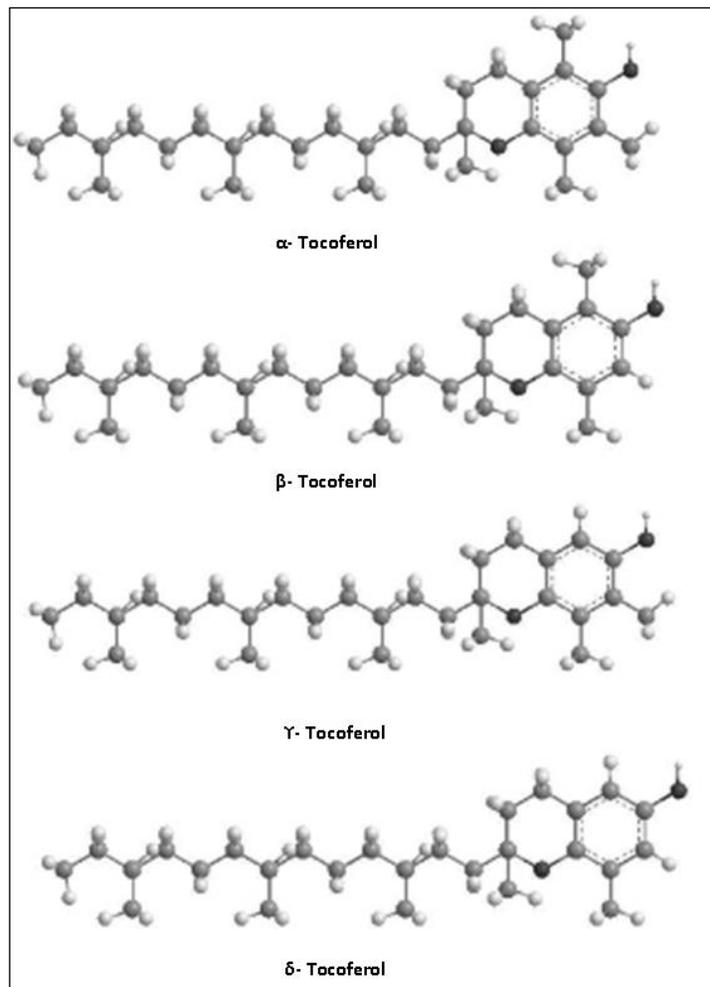
Los tocoferoles derivados de la vitamina E, son antioxidantes naturales solubles en lípidos que solo son producidos por las plantas. El término general "Vitamina E" se

utiliza para designar a un grupo de ocho especies naturales de tocoferoles y tocotrienoles ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  y  $\delta$ ). Junto con las vitaminas A, D y K constituyen el grupo de las vitaminas liposolubles, caracterizadas por ser derivados del núcleo isoprenoide, solubles en lípidos y disolventes orgánicos. Son compuestos esenciales, puesto que el organismo no puede sintetizarlas, por lo que su aporte se realiza a través de la dieta en pequeñas cantidades. Para una eficiente absorción por el organismo requieren de la presencia de ácidos grasos, de la bilis y de enzimas lipolíticas del páncreas y mucosa intestinal (Sayago et al., 2007).

La estructura química de la vitamina E consta de dos partes primarias: un anillo complejo cromano y una larga cadena lateral. Estos ocho cromóforos se dividen en dos grupos fundamentales: cuatro tocoferoles y cuatro tocotrienoles que se diferencian en la saturación de la cadena lateral; los tocoferoles tienen una cadena saturada y los tocotrienoles una insaturada con tres dobles enlaces en los carbonos 3, 7 y 11. Dentro de cada grupo, los cromóforos difieren en el número y posición de los grupos metilo en el anillo cromano, designándose como  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  y  $\delta$  (figura 2). El  $\alpha$ -tocoferol que es la principal forma de la vitamina E actúa rompiendo las reacciones en cadena durante la peroxidación de los lípidos, también actúa en la neutralización de especies de oxígeno reactivo como por ejemplo el oxígeno singulete. Se considera que sirve como la primera línea de defensa de la peroxidación de los lípidos. Por otro lado, este compuesto también exhibe una acción antiinflamatoria por inhibición de la producción de radicales libres o superóxidos en los neutrófilos activados (Liebler, 1993).

Mientras que los tocoferoles están presentes en todas las plantas superiores y en la mayoría de sus tejidos, sólo un número limitado de plantas tienen la capacidad para producir de manera simultánea tocoferoles y tocotrienoles. Entre ellas se mencionan a las semillas de cereales y los frutos (Piironen et al., 1986). La vitamina E se encuentra principalmente en los aceites vegetales; el aceite de germen de trigo destaca por su elevado contenido en tocoferoles, principalmente en el isómero  $\alpha$ -tocoferol (Pfeffer-Slobodinsky, 2004); lo que lo convierte en un producto muy

apreciado en el mundo de la cosmética por su elevado poder antioxidante. En otros aceites vegetales como en el de oliva resalta el contenido de  $\alpha$ -tocoferol (García et al., 2003; Galeano et al., 2004; Aguilera et al., 2005); al igual que en el aceite de girasol (Nolasco et al., 2006); mientras que en los aceites de soya, maíz y sésamo predomina el  $\gamma$ -tocoferol (Ferrari et al., 1996; Warner, 2000; Aued-Pimentel et al., 2006; Kanu et al., 2007), que al igual que los otros isómeros del tococromanol son compuestos bioactivos antioxidantes de gran interés por sus beneficios a la salud humana, ya que se considera que sirven como primera línea de defensa contra la formación de radicales libres; adicionalmente, Kanu et al., (2007); señala que el  $\gamma$  tocoferol contribuye en la disminución del contenido de lípidos en la sangre, reduciendo los niveles de colesterol.



**Figura 2.** Estructura molecular de los tocoferoles (Navas, 2010).

### 2.2.2 Catequina

Los polifenoles son fitoquímicos de bajo peso molecular, esenciales para el ser humano. Estos constituyen uno de los metabolitos secundarios de las plantas, más numerosos y distribuidos por toda la planta, con más de 800 estructuras conocidas en la actualidad. Los polifenoles naturales pueden ir desde moléculas simples (ácido fenólico, fenilpropanoides, flavonoides), hasta compuestos altamente polimerizados (ligninas, taninos). Su propiedad como antioxidante, proviene de su gran reactividad como donantes de electrones e hidrógenos y de la capacidad del radical formado para estabilizar y deslocalizar el electrón desapareado y de su habilidad para quelar iones de metales de transición. Su capacidad antioxidante está directamente relacionada con el grado de hidroxilación del compuesto (Casimir, 2002). Los flavonoides y ácidos fenólicos son productos secundarios del metabolismo de la planta y constan de antocianinas, catequinas (galato de epicatequina, epigallocatequina, etc), flavones, flavonoles, isoflavones y proantocianidinas. Varios de los flavonoides tienen actividad antioxidante relacionada con su capacidad de quelar metales. Los flavonoides representan el subgrupo más común y ampliamente distribuido. Al estar distribuidos en el reino vegetal, constituyen parte integral de la dieta. Los flavonoides tienen una poderosa acción antioxidante *in vitro*, siendo capaces de barrer un intervalo amplio de especies reactivas del oxígeno, nitrógeno y cloro, tales como el superóxido, el radical hidroxilo, el radical peroxilo, el ácido hipocloroso, actuando como agentes reductores. Su actividad antioxidante de estos compuestos varía grandemente y depende también del sistema alimentario.

Muchas investigaciones han sugerido que las propiedades antioxidantes de los polifenoles juegan un rol importante en la prevención de enfermedades cardiovasculares y algunos tipos de cáncer. El 93% del total de polifenoles del té verde está constituido por las catequinas, las cuales son flavonoides (Chen y col., 2009). Las catequinas del extracto de té verde actúan como secuestrantes de radicales libres, quelantes de metales e inhibidores de factores de transcripción y enzimas por lo que se han utilizado como antioxidantes, antivirales y

antibacterianos. También se han descrito actividades anticarcinogénicas y antimutagénicas por lo que su utilización en alimentos, no sólo permite controlar la oxidación sino que ofrece efectos benéficos para la salud. Poseen actividad biológica de quimioprotección sobre la iniciación y promoción de tumores (Higdon y Frei, 2003).

### 2.2.3 TBHQ (Butilhidroquinona terciaria)

TBHQ es un polvo de color beige fenólico. Es utilizado en la industria de frituras con aceites vegetales altamente insaturados. En general, se considera que es más eficaz en aceites vegetales que BHA o BHT. El ácido cítrico y TBHQ muestran una excelente sinergia en los aceites vegetales. El TBHQ es adecuado para sistemas con poca agua (aceites y grasas puras), mientras que los alimentos con más agua requieren antioxidantes lipófilos, como BHA y BHT y son más efectivos para los aceites insaturados (soya, canola, algodón, cártamo, etcétera) y los usados en la frituras (Badui, 2006).

La hidrogenación industrial y la desodorización de los aceites al alto vacío y temperatura, son las dos fuentes de origen tecnológico más importantes de formación de isómeros *trans* (Gangliostro, 2004). El consumo de ácidos grasos *trans* ha sido fuertemente cuestionado por los Comités de Expertos en Nutrición, ya que la evidencia científica indica que estos isómeros son dañinos para la salud, por sus efectos a nivel de los lípidos sanguíneos, por su acción inhibitoria sobre la actividad de enzimas hepáticas, y por la modificación que producen en la fluidez de las membranas celulares que se traducen, entre otros efectos, en un mayor potencial aterogénico. La recomendación es evitar el consumo de estos. Sin embargo, a la luz del conocimiento actual, la generalización del concepto sobre el efecto dañino de los ácidos grasos *trans* deberá ser revisada, ya que algunos pueden tener efectos beneficiosos en la nutrición y salud humana. Este es el caso del ácido linoleico conjugado (CLA) con isomería *trans* (Martínez, 2012). La ingestión diaria del CLA en los alimentos convencionales puede resultar insuficiente para que pueda expresar sus potenciales efectos bioquímicos, moleculares y fisiológicos

contra el cáncer, aterosclerosis y obesidad. El consumo de productos fritos como aperitivos (botanas tipo chips) aumenta a medida que se incrementa la oferta comercial; al igual que aumenta el consumo, crece la preocupación por la calidad nutricional de las chips y el consumo de calorías vacías.

## **2.3 Esteroles**

Son sustancias integradas por el grupo perhidrociclopentanofenantreno, una cadena hidrocarbonada y un grupo alcohol, y se encuentran tanto en el reino vegetal como en el animal. En el primer caso reciben el nombre genérico de fitosteroles, entre los que destaca el b-sitosterol (80% de todos los esteroles vegetales), seguido del estigmasterol (15%), del campesterol, del resveratrol y de otros; aparentemente funcionan de la misma manera que lo hace el colesterol en el tejido animal, es decir, estabilizando la membrana y controlando su permeabilidad; son estables a las altas temperaturas, inodoros e insaboros, y algunos actúan reduciendo la oxidación de los aceites (Badui, 2006). Los fitoesteroles y fitoestanoles son los miembros más importantes de este grupo cuya estructura es semejante al colesterol de origen animal, pero este último presenta una cadena lateral de 8 átomos de carbono, mientras que en la mayoría de los fitoesteroles la cadena es de 9 o más átomos de carbono.

### **2.3.1 Fitoesteroles**

Los fitoesteroles son triterpenos insaturados con uno o dos dobles enlaces entre carbono y carbono; más de 100 tipos diferentes de fitoesteroles han sido encontrados (Fernández y Cabral, 2007). Estas moléculas no son sintetizadas por el ser humano, derivan exclusivamente de productos de origen vegetal, están presentes en los frutos, semillas, hojas y tallos de prácticamente todos los vegetales conocidos, así como también en aceite de germen de maíz y trigo, girasol, soya, nueces y otros.

Hoy en día hay un interés creciente en los fitoesteroles debido al rol que desempeñan en el control de los niveles de colesterol y en la reducción de la arteriosclerosis (Lecerf, 2007). Beveridge et al., (2005), aseguran que los fitoesteroles son los responsables de la actividad antiarterosclerótica observada al consumir el aceite vegetal virgen. Ikeda et al., (1988); señalan que la concentración sérica de fitoesteroles en humanos está en el intervalo de 0.3-1.7 mg/dL, esto es, mucho menor que la de colesterol (150-300 mg/dL). Se considera que los fitoesteroles y fitoestanoles al ser análogos del colesterol, compiten con él por los sitios de absorción intestinal, por los cuales tienen una mayor afinidad, reduciendo la absorción del colesterol LDL o conocido como colesterol “malo” (Ostlund, 2007). Por lo tanto, los fitoesteroles son componentes importantes para una dieta adecuada y sobre todo, para aquellas dietas especiales destinadas a reducir la hipercolesterolemia, por ello, su consumo se ha asociado con la disminución del riesgo de enfermedades del corazón, también se ha reconocido que los fitoesteroles y fitoestanoles poseen propiedades inmunomoduladores que podrían ser benéficas para la prevención del cáncer de colon, cáncer de mama y daño tisular asociado a inflamación (Bouic, 2001; Gylling y Miettinen, 2005).

Los fitoesteroles son caros y para que tengan verdaderamente un efecto de reducción de colesterol deben consumirse entre 1 y 2 gramos por día; éstos se obtienen de la destilación de los productos recuperados de la desodorización de los aceites, como el de soya; por esta razón, en el mercado existen margarinas y otros alimentos que evitan o reducen la absorción del colesterol a base de una combinación de fitoesteroles de proteínas de soya y de fibras solubles derivadas del  $\beta$ -glucano; estos dos últimos ingredientes son mucho más baratos que los esteroides (Badui, 2006), pero aun así no se logra cubrir la ingesta diaria.

La hidrogenación industrial y la desodorización de los aceites al alto vacío y temperatura, son las dos fuentes de origen tecnológico más importantes de formación de isómeros *trans* (Gangliostro, 2004).

Como se comentó anteriormente, el consumo de ácidos grasos *trans* ha sido fuertemente cuestionado por los Comités de Expertos en Nutrición, ya que la evidencia científica indica que estos isómeros son dañinos para la salud, por sus efectos a nivel de los lípidos sanguíneos, por su acción inhibitoria sobre la actividad de enzimas hepáticas, y por la modificación que producen en la fluidez de las membranas celulares que se traducen, entre otros efectos, en un mayor potencial aterogénico.

La recomendación es evitar el consumo de estos. Sin embargo, a la luz del conocimiento actual, la generalización del concepto sobre el efecto dañino de los ácidos grasos *trans* deberá ser revisada, ya que algunos pueden tener efectos beneficiosos en la nutrición y salud humana. Este es el caso del ácido linoleico conjugado (CLA) con isomería *trans* (Martínez, 2012).

La ingestión diaria del CLA en los alimentos convencionales puede resultar insuficiente para que pueda expresar sus potenciales efectos bioquímicos, moleculares y fisiológicos contra el cáncer, aterosclerosis y obesidad.

El mercado mundial de productos fritos crece continuamente y representa grandes cantidades de dinero. Productos importantes como nuggets de pollo, papas a la francesa, pollo frito, carne para hamburguesas, totopos o “nachos”, entre otros tienen alta demanda y consumo (Sosa-Morales y Vélez-Ruiz, 2009). El consumo de productos fritos como aperitivos (botanas tipo chips) aumenta a medida que se incrementa la oferta comercial; al igual que aumenta el consumo, crece la preocupación por la calidad nutricional de las chips y el consumo de calorías vacías. En la cuenca del papaloapan se consumen chips de plátano macho y yuca como parte de la dieta diaria.

#### **2.4 El plátano macho (*Musa paradisiaca* AAB)**

El plátano macho (*Musa paradisiaca* AAB) pertenece a la familia de las Musáceas del género *Musa* de la especie *Musa paradisiaca*. Deriva de la hibridación de AA x

BB, es decir de la hibridación de *M. acuminata* con *M. balbisiana*. Tiene su origen en Asia meridional, siendo conocida en el Mediterráneo desde el año 650. La especie llegó a Canarias en el siglo XV y desde allí fue llevado a América en el año 1,516. El cultivo comercial se inicia en Canarias a finales del siglo XIX y principios del siglo XX (Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria, 2010). El cultivo de las Musáceas, mejor conocidas como Banano *Musa carvedishii* L y Plátano *Musa Paradisiaca* L representa uno los frutales básicos en la alimentación mexicana; y las dos variedades más cultivadas. El estado de Oaxaca es el cuarto productor de plátano macho a nivel nacional con un total de 37,856.20 toneladas (SIAP-SAGARPA, 2015).

#### **2.4.1 Composición del plátano macho**

El fruto del plátano en estado inmaduro se ha reportado que contiene 70-74% de humedad, 1% de proteína, 0.3-0.5% de grasa, 20-30% de carbohidratos totales, 0.5% de fibra bruta, del 3.5% de fibra dietaria y el 1% de ceniza (Tobin y Muller, 1988; Chávez et al., 1992). Destaca su contenido de carbohidratos, por lo que su valor calórico es elevado. Los nutrientes más representativos del plátano son el potasio, el magnesio, el ácido fólico y sustancias de acción astringente; sin pasar por alto su elevado aporte de fibra, del tipo fruto-oligosacáridos (Secretaría de economía, 2012).

El plátano es una de las frutas más nutritivas por su riqueza en azúcares (levulosa, glucosa y sacarosa) contiene vitamina A, B1, B2 y vitamina C, minerales como calcio, fósforo, hierro, potasio, magnesio y zinc. Es una de las frutas más concentradas en principios energéticos, ya que deja residuos alcalinos por lo que nutre, alcaliniza y desintoxica al organismo, es rico en líquidos volátiles que estimulan la secreción de sustancias digestivas y ejercen una ligera acción antiséptica en el conducto intestinal (Navarro et al., 2008).

### **2.4.2 Usos del plátano macho**

El plátano macho verde o maduro tiene numerosas aplicaciones en el arte culinario, ya sea cocido o frito entre otras variedades. Recientemente, ha habido un desarrollo de la industria del procesamiento de esta fruta, implementándose industrias a nivel casero y semi-industrial para procesar el plátano macho en frituras tipo “chips”, harinas, pulpa seca, jaleas, bebidas destiladas y otros (Happi-Emaga et al., 2007,2008).

### **2.4.3 Producción mundial del plátano macho**

El plátano es el Tercer fruto más importante del mundo, además de ser considerado un producto básico y de exportación, constituyendo una importante fuente de empleo e ingresos en numerosos países en desarrollo. Se comercializa en fresco y, en menor escala, deshidratado y en harina (FAO, 2009).

La producción mundial de plátano macho para el año 2004 fue de 32.8 millones de toneladas con una tasa media de crecimiento anual del 1.15% para el periodo 1994 al 2004 Dentro de los 11 principales países productores de plátano macho (con el 83% del total), destaca Uganda con un 30% del total, así como otros países de Sudamérica (Colombia y Perú), de Centroamérica y el Caribe (Ecuador y Cuba), y de África (Rwanda, Ghana, Nigeria, Costa de Marfil, Camerún y Congo). La tasa media de crecimiento anual de la producción de plátano macho para la mayoría de los países productores es positiva, con niveles muy favorables (cercaos ó superiores al 5%), para países como Cuba, Rwanda y Ghana, y entre el 1.5 al 2.6% para naciones como Colombia, Nigeria y Uganda. En el caso de México, y de acuerdo con la Secretaría de Agricultura, la producción de plátano macho para el año 2004 fue de 228 mil toneladas, equivalente al 0.70% de la producción mundial. De acuerdo con la FAOASTAT (2006) México ocupó el décimo sexto lugar en rendimiento a nivel mundial con 29 ton/Ha en el 2004 (Navarro et al., 2008).

#### **2.4.4 Producción nacional del plátano macho**

El plátano (*Musa paradisiaca*) es uno de los cultivos más importantes en la agricultura mexicana, ocupa el segundo lugar de la producción en frutas tropicales, porque es básico en la alimentación, su precio bajo, sabor agradable, disponibilidad todo el año, combinaciones múltiples en la preparación de alimentos, genera sensación de saciedad, su valor nutritivo es alto y aporta potasio, hierro y vitamina K (COVECA, 2010). El consumo total y *per cápita* promedio del 2000 al 2010 fue 2, 037,909 ton y 19.7 kg; la producción fue 2, 114, 182 ton de la cual 96.4% fue para el mercado nacional.

La región platanera se ubica en las regiones costeras del Océano Pacífico y Golfo de México. Los principales Estados productores son Chiapas, Veracruz, Tabasco, Nayarit, Michoacán, Colima, Oaxaca, Guerrero y Jalisco, los cuales se agrupan en tres regiones productoras: Región del Golfo de México (Tabasco, Veracruz y Oaxaca) que ocupa el 41% de la superficie, Región del Pacífico Centro (Colima, Michoacán, Jalisco, Guerrero y Nayarit) con el 27% y la Región del Pacífico.

En México después del plátano enano gigante, el plátano macho es la segunda variedad que más se produce, con una producción anual de 343,777.98 ton. La mayor parte se produce en el estado de Chiapas en el 2013 se obtuvo 131,499.45 toneladas de producción, seguido por el estado de Veracruz con 63,479.08 toneladas, y el estado de Oaxaca con una producción de 38,850.20 toneladas ocupando el tercer lugar a nivel nacional (SIAP-SAGARPA, 2013).

#### **2.4.5 Producción municipal del plátano macho**

La superficie sembrada estimada para el distrito de Tuxtepec es de 1,380.00 hectáreas siendo el municipio de San Juan Bautista Tuxtepec en tener la mayor producción valorada 26,469.20 toneladas según SIAP-SAGARPA (2015).



**Figura 3.** Plantación de la Finca Mundo Nuevo de Tuxtepec.

Fuente: <http://www.fincamundonuevo.com/galeria.html>

### **2.5 Yuca (*Manihot esculenta* Crantz)**

La yuca, la segunda materia prima en esta investigación fue inicialmente introducida en África hace 400 años donde su cultivo fue extendido para la alimentación en las regiones tropicales y subtropicales. La yuca ha pasado de ser un cultivo de subsistencia a un cultivo completamente comercial completo, por su capacidad de generación de ingresos (Kabeya et al., 2012). En general, los tubérculos de yuca poseen una pulpa de color blanco o crema y contienen cantidades insignificantes de carotenoides. Por otra parte, Los tubérculos son una fuente potencial de biomasa y se sabe que son una fuente de alimentos que promueven la salud. Ellos contienen inulina en lugar de almidón (Marx et al., 1997). Una reserva de carbohidratos, polímeros de fructosa y la degradación de productos quienes son los mayores componentes de interés en la industria de alimentos y como ingredientes de alimentos funcionales y materiales alimenticios bajos en calorías.

La yuca (*Manihot esculenta* Crantz) se cultiva en más de noventa países y les permite subsistir a más de quinientos millones de personas en el mundo en desarrollo. Esta raíz rústica no sólo es un alimento básico para muchas familias agrícolas de escasos recursos, sino también materia prima para elaborar concentrados comerciales para animales, fibra para los fabricantes de papel y de textiles y almidón para la industria de alimentos y la farmacéutica. La producción

mundial de yuca se sitúa alrededor de 260 millones de toneladas por año. El 50% de las hectáreas dedicadas al cultivo de la yuca se encuentran en África, un 30% en Asia y el 20% restante en América Latina ([www.ciat.cgiar.org](http://www.ciat.cgiar.org)).

Para la FAO, la yuca podría ayudar a proteger la seguridad alimentaria y energética de los países pobres, amenazados en la actualidad por los crecientes precios de los alimentos y el petróleo. Por su gran versatilidad de uso, ya sea en la alimentación humana, en la industria o para la elaboración de forrajes para ganado, entre otros, se ha convertido en el cuarto cultivo más importante en el mundo, sólo superado por el maíz, el arroz y el trigo (algunos autores también incluyen en este orden de importancia la caña de azúcar).

### **2.5.1 Producción mundial de yuca**

Para el año 2012, la producción mundial de yuca fue de 207,002,339 Ton, de los cuales los principales países productores fueron: Nigeria (54,000,000 Ton), Indonesia (23,922,075 Ton), Tailandia (22,500,000 Ton), República Democrática de Congo (16,000,000 Ton) representando 26.1, 11.6, 10.9 y 7.7% respectivamente de la producción total a nivel mundial, de acuerdo a la FAOSTAT, (2012).

### **2.5.2 Producción de yuca en México**

La producción nacional de yuca en México para el año 2012 fue de 18,532.8 Ton de las cuales los principales estados productores de yuca fueron: Tabasco (13,033.4 Ton), Michoacán (3,516 Ton), Morelos (1,487.90 ton), Yucatán (286 Ton), Veracruz (160 Ton), representando el 70.3, 19, 8, 1.5 y 0.9%, respectivamente, de acuerdo a fuentes del SIAP-SAGARPA (2012).

Las tendencias mundiales en alimentación muestran un interés acentuado de los consumidores por alimentos que además del valor nutritivo, aporten beneficios a las funciones fisiológicas del organismo humano; este interés lleva a elaborar chips de plátano macho y yuca sometidos al proceso de freído utilizando aceite de soya

enriquecido con CLA además de ser un producto muy consumido en la región le aportará propiedades anti-carcinogénicas benéficas para la salud.

## 2.6 Freído

El freído de alimentos es uno de los métodos de cocción que mayor aceptación mundial tiene, porque además de tener sabor y textura crujiente su preparación es rápida y sencilla. Sin embargo el alto consumo de alimentos fritos es considerado un factor de riesgo para la salud, dado el alto contenido calórico que presentan por su alto contenido de grasa y por la formación de compuestos tóxicos, debido principalmente a procesos agresivos de fritura, entre ellos la acrilamida, las cuales se han relacionado con el desarrollo de enfermedades cardiovasculares y algunos tipos de cáncer (Saguy y Dana, 2003).

El proceso de freído puede ser definido como un proceso de cocción y secado de alimentos, por su inmersión en un fluido comestible (grasa) a una temperatura mayor que la temperatura de ebullición del agua.

La popularidad de los procesos fritos puede ser atribuida a las características de los productos obtenidos. El freído genera productos sabrosos con un exterior crujiente y su parte interior jugosa y suave. El objetivo de la fritura consiste en “sellar” los alimentos en aceite caliente para que los sabores y jugo presentes en él sean retenidos en una corteza crujiente, es así como la mayoría de las características deseables de los productos fritos proviene de la formación de una estructura compuesta por una capa externa o corteza crocante, porosa y aceitosa y un interior húmedo y cocinado (Saguy y Dana, 2003).

Generalmente, los tiempos de freído son menores que los de cocción en agua y al vapor, pero depende del tipo de alimento, la temperatura del aceite, el sistema de fritura, el grosor del alimento y los cambios que se pretende conseguir. El inconveniente de este proceso de preparación está en la incorporación de aceite al alimento incrementando significativamente el aporte calórico y el consumo de grasa.

El freído se caracteriza por formar una “costra” en la superficie del alimento y generar un sabor característico, agradable. Durante la fritura se presentan cambios en la composición nutricional de los alimentos, estos dependen del tipo de grasa, de las características propias del alimento, del tiempo, la temperatura y demás condiciones del proceso. Es también considerado un proceso de deshidratación, con tres características distintivas: corto tiempo de cocción debido a la rápida transferencia de calor que se logra con el aceite caliente; temperatura en el interior del alimento menor a 100 °C; y absorción de la grasa del medio por el alimento a medida que un producto alimenticio es freído, las células internas se van deshidratando y el agua evaporada es parcialmente reemplazada por el aceite de freído (Fillion y Henry, 1998).

Las temperaturas de freído son elevadas, pero únicamente la superficie del alimento frito se calienta a 100 °C debido al tiempo corto de freído. El interior del alimento alcanza temperaturas de 70 a 98 °C (Dimitrios y Elmadfa, 1999).

En el proceso de freído se usan grasas y aceites como medio de transferencia de calor al producto. Un buen alimento frito no se puede obtener si no se usa un aceite de buena calidad, sin embargo, casi todos los tipos de grasas y aceites pueden ser utilizados para la fritura, incluyendo aceites vegetales con y sin hidrogenar, grasas animales, mezclas de los anteriores y margarinas. El aceite juega un rol fundamental en la preparación de alimentos fritos ya que éste sirve como medio de transferencia de calor entre el alimento y la freidora (Aguilera y Hernández, 2000).

El calor se transfiere por convección desde el aceite caliente a la superficie de la pieza, posteriormente, la transferencia de calor al interior del alimento ocurre por conducción. El agua que abandona el alimento genera un enfriamiento en el frente de evaporación. La transferencia de masa es caracterizada por la pérdida de agua desde el alimento como vapor de agua y el movimiento de aceite al interior del alimento.

### 2.6.1 Tipos de freído

Existen dos formas para realizar el freído: superficial o en poca grasa y profunda o por inmersión en abundante grasa.

La primera, se realiza en un recipiente más o menos plano, tipo sartén, precalentado, donde parte del alimento queda fuera del aceite o grasa. La cantidad de aceite utilizado es mínima, pero suficiente para evitar que se adhiera el producto. La sartén no debe taparse para evitar que la parte no sumergida se cocine por efecto del vapor interno generado al calentarse. Este método se usa para alimentos con una gran superficie. El calor se transfiere por conducción al alimento a través de una capa delgada de aceite desde la superficie del medio de calentamiento (Pinthus y Saguy, 1994).

El freído por inmersión es uno de los procesos más antiguos de preparación de alimentos. Por décadas, los consumidores han preferido los productos fritos en inmersión debido a la combinación única de textura y sabor que ellos poseen. La temperatura del aceite caliente, el tiempo de fritura y tipo de freidora son factores que afectan el proceso. El alimento se sumerge totalmente en aceite caliente; normalmente se realiza en una freidora o en recipientes profundos con una capacidad alta para contener el aceite, en una relación producto: aceite entre 1:6 y 1:10, es decir que por cada gramo de alimento que se prepare debe adicionarse de 6 a 10 mL de aceite para mantener la relación. Este tipo de fritura es uniforme en toda la superficie y por lo general, el alimento se sumerge previamente en un capeado o batido para formar una capa protectora entre el alimento y la grasa (Suaterna, 2009).

Los alimentos fritos se consumen cotidianamente y contribuyen a la ingestión de grasas en la dieta. Las grasas y aceites ofrecen propiedades especiales incluyendo sabor, suavidad y una sensación característica en la boca que mejora la palatabilidad. Uno de los parámetros más importantes de calidad de los productos fritos es la cantidad de grasa absorbida durante el proceso de freído. Algunos de

ellos contienen altas cantidades de grasa en algunos casos más del 45% del producto total (Phintus y Saguy, 1994).

El aceite o grasa usada en la fritura determina la aceptabilidad del alimento, ya que en parte, el aceite de fritura es absorbido por éste. En el aceite de fritura se produce una gran cantidad de cambios físicos y químicos, como consecuencia de la interacción entre el aceite, el agua y otros componentes del alimento. Por todo ello, el aceite utilizado determina la calidad del alimento, así como las condiciones del proceso y la composición del producto (Vitrac et al., 2001).

En la Tabla 2, se presentan algunos de los aceites más utilizados para la fritura industrial o de restauración.

**Tabla 2.** Principales tipos de grasas y aceites utilizados para la fritura.

| Tipo                 | Grasas y aceites              |
|----------------------|-------------------------------|
| Grasas animales      | Manteca de cerdo              |
|                      | Sebos                         |
| Aceites vegetales    | Oliva                         |
|                      | Girasol                       |
|                      | Soya                          |
|                      | Maíz                          |
|                      | Algodón                       |
|                      | Colza                         |
| Grasas vegetales     | Cacahuete                     |
|                      | Palma                         |
|                      | Palmiste                      |
| Fracciones de grasas | Coco                          |
|                      | Estearina de algodón          |
|                      | Oleína se palma               |
| Grasas hidrogenadas  | Estearina de palma            |
|                      | Aceite de pescado hidrogenado |
|                      | Oleína de palma hidrogenada   |
|                      | Aceite de soya hidrogenada    |

Fuente: Vitrac et al., 2001.

Los aceites para fritura deben ser frescos y sujetos a criterios de calidad, como los que se presentan en la tabla 3. Independientemente de la naturaleza del aceite o grasa usada en el proceso, su calidad puede tener una gran influencia en la calidad

del producto frito y en la estabilidad del aceite a elevadas temperaturas (Dobarganes et al., 2000).

### **2.6.2 Factores que afectan la penetración y la absorción de aceite en el alimento**

Los alimentos fritos se consumen cotidianamente y contribuyen a la ingestión de grasas en la dieta. Las grasas y aceites ofrecen propiedades especiales incluyendo sabor, suavidad y una sensación característica en la boca que mejora la palatabilidad. Uno de los parámetros más importantes de calidad de los productos fritos es la cantidad de grasa absorbida durante el proceso de freído. Algunos de ellos contienen altas cantidades de grasa en algunos casos más del 45% del producto total (Phintus y Saguy, 1994).

De acuerdo a Paul y Mittal (1997), los factores más importantes en penetración y absorción de aceite son los siguientes:

- a) La geometría del alimento: la penetración del aceite depende en gran parte de la relación entre el área y el volumen del alimento. Una papa a la francesa contiene alrededor de 13.5% de aceite, a diferencia de una papa “chip” frita, que contiene hasta 40%, ya que la superficie de esta última es de 10 a 15 veces mayor.
- b) La viscosidad del aceite de freído: es un factor importante, mientras mayor sea la viscosidad del aceite, mayor será el volumen de aceite en el alimento freído.
- c) Gravedad específica del alimento: de manera general, un aumento en la gravedad específica del alimento significa un aumento en el contenido de humedad y, como consecuencia, una mayor cantidad de vapor que reduce el tiempo de contacto entre el aceite y el alimento. Lo anterior da como resultado una mayor absorción de aceite por parte del alimento.

- d) Tipo de alimento: influye en la cantidad de aceite absorbido, debido a que las características de textura, porosidad y orientación de espacios capilares, entre otros, son diferentes para cada alimento.
- e) Temperatura del medio de freído: la absorción de aceite disminuye con temperaturas mayores a 180-200 °C, sin embargo, esta temperatura no es usada comúnmente en freído.
- f) Tiempo de freído: la absorción de aceite aumenta con largos periodos de tiempo de freído.

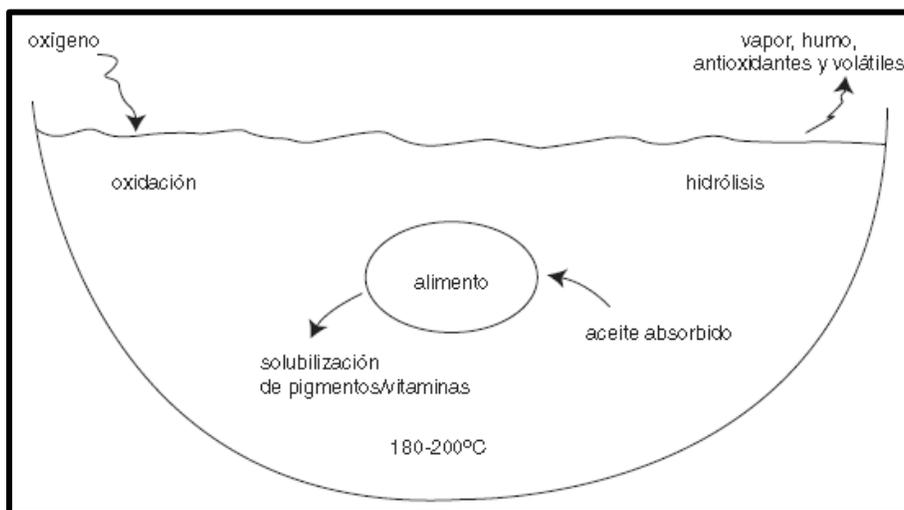
El contenido de aceite afecta la aceptabilidad del consumidor en productos fritos, por lo tanto se han estudiado algunos de los mecanismos para la absorción de aceite durante el proceso de freído y entre ellos están (Alvis et al., 2008):

1. *Retención física*: la mayor concentración de aceite tiende a encontrarse en la corteza externa, lo cual se debe a la formación de huecos y ampollas durante el freído.
2. *Reemplazo del agua*: Sugiere que luego del escape del agua en forma de vapor los sitios por los cuales salió el vapor se secan y pierden su hidrofobicidad, entonces el aceite se adhiere a la superficie para posteriormente penetrar al interior por las áreas dañadas.
3. *Succión por vacío*: postula que el aceite adherido es forzado a ingresar al interior del alimento al removerse éste de la freidora, producto del vacío generado por condensación del vapor.
4. *Penetración capilar*: Este mecanismo se basa en la existencia de una matriz porosa en la cual existe penetración de aceite por capilaridad y que la fuerza impulsora es la diferencia de presión a través de la superficie.

La información sobre mecanismos de absorción de aceite en productos fritos está poco sustentada, lo más probable es que durante el freído operan simultáneamente varios de ellos (Aguilera y Hernández, 2000).

### 2.6.3 Cambios químicos en el freído

En el freído ocurre un gran número de transformaciones (figura 4). Las altas temperaturas provocan la deshidratación de los alimentos, parcial en el caso de carnes y casi total en el de botanas, lo que ocasiona la absorción de aceite en los espacios que deja el agua (en las papas llega hasta un 40%). El vapor generado favorece la hidrólisis de los triacilglicéridos y la liberación de ácidos grasos, de mono y diacilglicéridos y de glicerina; si el aceite es láurico (coco, palmiste), se generan jabones y si los ácidos libres son de cadena larga, actúan como espumantes y solubilizan los metales, facilitando la oxidación de los insaturados. Con la inclusión de oxígeno por efecto de la aireación se forman hidroperóxidos muy reactivos que provocan la síntesis de aldehídos, cetonas, ácidos, etc., con olores característicos de rancidez.



**Figura 4.** Cambios durante el freído (Badui, 2006).

El aceite, al ser un disolvente no polar, extrae los pigmentos y las vitaminas liposolubles y los vuelve más sensibles al calor y al oxígeno. Todos estos cambios se reflejan en un incremento de la viscosidad y de los ácidos grasos libres, de generación de colores oscuros y de espuma, de reducción del índice de yodo, etc.

De acuerdo con la composición del alimento se presentan otros cambios: gelatinización de almidones, reacciones de Maillard y de caramelización, etc. El exceso de agua en el alimento debe evitarse; los productos capeados, con alto contenido de carbohidratos favorecen la degradación del aceite; además, en la formulación de algunos capeadores comerciales se incluyen bicarbonatos de sodio o potasio que propician la hidrólisis de los triacilglicéridos y la formación de jabones. Los vegetales contienen cobre, manganeso y hierro en menos de 1 ppm, los cuales aceleran la oxidación; del mismo modo, los sulfitos (para evitar el oscurecimiento enzimático y no enzimático) provocan reacciones de decoloración y olores desagradables (Badui, 2006).

Durante el freído, las grasas y aceites son continuamente o repetidamente calentados a altas temperaturas durante períodos prolongados en la presencia de aire. Esto conduce a una variedad de reacciones químicas que pueden clasificarse como: hidrólisis, oxidación y polimerización de la molécula de triacilglicerol (Takeoka et al., 1997).

#### 1) *Aereación.*

Ocurre al penetrar el oxígeno del aire atmosférico en el aceite o manteca de freído, el oxígeno reacciona con estos mediante oxidación. Esta reacción ocurre vía radicales libres. Forma primero radicales peróxido que al reaccionar con el oxígeno forman radicales hidroperóxidos y más radicales libres. Los peróxidos se descomponen en aldehídos, alcoholes, ácidos orgánicos e hidrocarburos. Estos últimos producen el sabor y aroma "rancio" en una grasa y/o alimento.

#### 2) *Absorción.*

El alimento absorbe grasa ya sea como aceite o manteca fenómeno que se ve impulsado por la vaporización o pérdida de agua. La velocidad de evaporación está ligada con la absorción del aceite porque el lugar que deja el agua en el alimento al evaporarse lo llena el aceite o manteca. La absorción de aceite o manteca depende de las condiciones de freído y de las características del alimento (Vitrac, 2002).

### 3) *Solubilización.*

Los alimentos que se fríen contienen sustancias liposolubles tales como grasas, fosfolípidos y carotenoides que se transfieren al aceite de freído provocando cambios en su composición y estabilidad. Por ejemplo la grasa de pollo contiene una cantidad considerable de fosfolípidos y ácido oleico, el pescado contiene gran cantidad de ácidos grasos insaturados que se oxidan rápidamente.

### 4) *Hidrólisis.*

El agua de los alimentos y la temperatura elevada en presencia de un surfactante que bien puede ser un residuo de jabón provoca hidrólisis produciendo diglicéridos, monoglicéridos y ácidos grasos libres.

### 5) *Vaporización.*

La temperatura elevada provoca la vaporización de compuestos volátiles en forma de humo tales como ácidos grasos, productos de oxidación y antioxidantes volátiles como BHA y BHT. El TBHQ y los Tocoferoles tienen una volatilidad muy baja y gran estabilidad térmica por lo que se recomiendan ampliamente para proteger aceites y mantecas de freído contra la oxidación (Yoon y Choe, 2007).

### 6) *Calentamiento.*

El calentamiento induce a la formación de dímeros entre los ácidos grasos y a la formación de compuestos cíclicos vía la reacción de Diels Alder entre un dieno y un dienófilo. Un calentamiento excesivo produce también la descomposición térmica en el aceite o manteca. Las temperaturas usadas en el freído son generalmente de 162 a 180 °C. Temperaturas mayores favorecen el deterioro del aceite y temperaturas menores incrementan el tiempo de freído. Además las temperaturas bajas son insuficientes para recuperar las pérdidas de calor por evaporación.

Durante el freído por inmersión los alimentos pierden agua la cual se transforma en vapor, se forma una costra con numerosas cavidades, poros y una gran superficie. La grasa llena los volúmenes producidos por la pérdida de agua (Costa, 2004). Las piezas pequeñas se fríen más rápido mientras que las piezas más grandes requieren mayor tiempo de freído. Las piezas grandes requieren de menor temperatura de freído para no quemar la superficie. Una misma masa dividida en

piezas pequeñas se freirá más rápido dado que tiene más área superficial para la transferencia de masa y calor y menor masa para ser transformada, que una que está dividida en piezas mayores. Las piezas grandes requieren de menor temperatura para que la transferencia de calor sea gradual (Dobarganes et al., 2000; Moreira, 2001).

Los productos de descomposición formados por estos procesos pueden ser volátiles o no volátiles y someterse a una mayor degradación. Existe evidencia de que los aceites altamente oxidados y calentados exhiben efectos nocivos para la salud cuando se administran a animales de laboratorio.

El diseño del freidor es el tercer elemento que influye para lograr una buena operación industrial. El acero inoxidable es lo ideal, y tiene que ser lo más hermético posible para evitar la luz y el oxígeno, así como tener una relación mínima superficie/volumen; las bombas de recirculación de aceite no deben provocar turbulencia e inclusión de oxígeno. Un programa permanente de limpieza es necesario para evitar la acumulación de polímeros que a su vez propician más oxidación (Badui, 2006).

En el mercado existen los aceites de alta estabilidad, específicos para resistir condiciones drásticas de operación industrial. Su fabricación parte de un aceite parcialmente hidrogenado para reducir los poliinsaturados, y después se eliminan los triacilglicéridos de alto punto de fusión mediante un fraccionamiento seco. Es claro que a mayor hidrogenación mejor estabilidad, pero también menor rendimiento. Estos aceites suelen contener tocoferoles y tocotrienoles que contribuyen a su estabilidad oxidativa, sobre todo al de soya (Badui, 2006).

Varios métodos de análisis para el control de calidad del aceite de fritura se han reportado tales como la medición de la viscosidad (Chang et al., 1978), polímeros (Peled et al., 1975), constante dieléctrica (Fritsch et al., 1979), punto de humo, grupos carbonilos y ácidos grasos libres (Papastergiadis et al., 2014), compuestos polares por cromatografía en columna (Billek et al., 1978), dímeros por

cromatografía de gases (CG) (Paradis y Nawar, 1981), monómeros cíclicos (Melzer et al., 1981) y ácidos grasos de cadena corta (Dobarganes, 1996).

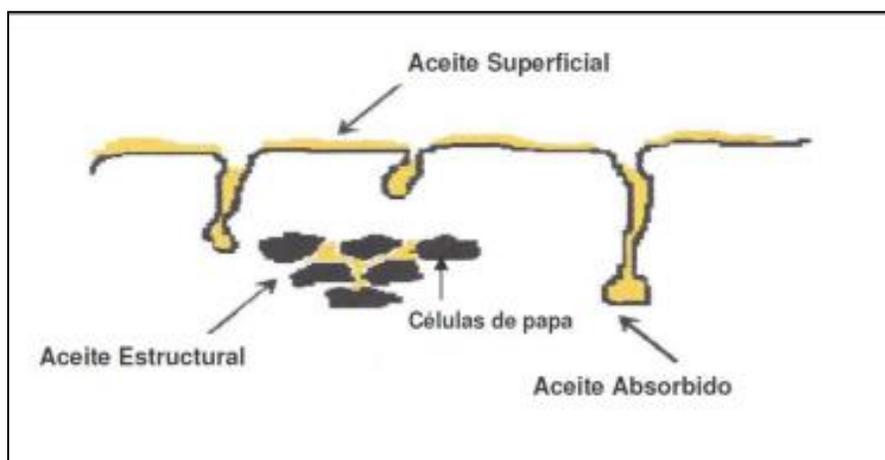
Algunos de los métodos mencionados son ahora los métodos oficiales A.O.C.S. (American Oil Chemists Society). Un método para la evaluación de la degradación de aceite de freído es la medición de ácidos grasos oxidados insolubles en éter de petróleo.

Durante el proceso de freído las características físicas, químicas y sensoriales de los alimentos son modificadas. La textura, el color y el contenido de aceite son los principales parámetros (Bunger et al., 2003).

## 2.6.4 Evolución de parámetros físicos durante el freído

### 2.6.4.1 Contenido del aceite

Ouchon et al., (2003) identificaron la existencia de tres fracciones de aceite, que dependen del momento en que son absorbidas: el aceite estructural (AE) absorbido durante la fritura; el aceite superficial absorbido (AA) absorbido durante el enfriamiento; y el aceite superficial (AS) que es el que permanece en la superficie (Figura 5).



**Figura 5.** Diagrama de las tres fracciones de aceite durante el proceso de fritura. (Ouchon et al., 2003)

Es importante destacar que la mayoría del aceite se concentra en la superficie y no penetra durante el proceso de freído en sí, sino más bien una alta proporción de aceite superficial penetra al interior de la microestructura durante la remoción, que corresponde al periodo de post-freído o período de enfriamiento, lo que permite concluir que pese a estar relacionados, la pérdida de agua y la succión de aceite no son procesos sincrónicos (Ouchon et al., 2003; Moyano y Pedreschi, 2005).

Desde el punto de vista nutricional cada vez más se espera productos con menor cantidad de aceite dado los riesgos que significa para la salud el exceso de grasas y por otro lado, los costos de producción aumentan con un gasto mayor de aceite, por lo tanto tecnológicamente se exige una menor absorción de aceite para la economía del proceso de freído. Es por esto que muchas investigaciones se desarrollan con el objetivo de disminuir la absorción de aceite durante el freído. Ellas están focalizadas a la adición de compuestos químicos que pueden disminuir la absorción de aceite, técnicas de cocción y en pretratamientos (Allen y Rojas, 2009).

Sin embargo, los principales parámetros del proceso que influyen en la absorción de aceite son la temperatura y tiempo de freído. Se ha encontrado que temperaturas en un intervalo de 150 y 180 °C no tiene un efecto significativo (Varela y Ruiz-Ruso, 1998). Generalmente, a altas temperaturas la absorción de aceite decrece (Rioseco, 1999; Pedreschi y Moyano, 2005b) y las chips sufren modificaciones en la textura y el color.

#### **2.6.4.2 Textura**

Textura es la propiedad sensorial de los alimentos que se detecta por los sentidos del tacto, la vista y el oído, y que se manifiesta cuando el alimento sufre una deformación (Anzaldúa-Morales, 1994). No se puede hablar de la textura como si fuera una sola característica de un alimento, sino que, más correctamente, hay que referirse a los atributos de textura, o las características o propiedades de textura del alimento, tales como: firmeza, dureza, fragilidad, adhesividad, cohesividad, elasticidad y viscosidad (Sigurgisladottir et al., 1999).

### **2.6.4.3 Color**

El color es el atributo de calidad más relevante en alimentos y debe ser controlado durante la manipulación y el procesamiento. El color de las papas es un criterio extremadamente importante para la industria de procesamiento de la papa y está estrictamente relacionado a la percepción del consumidor, quienes tienden a asociarlo con el sabor, el tiempo de almacenamiento, la nutrición y el nivel de satisfacción (Pedreschi y Moyano, 2007a).

El desarrollo del color comienza sólo cuando el alimento se ha secado una cantidad suficiente y también depende de la razón de secado, y el coeficiente de transferencia de calor durante las diferentes etapas de la fritura (Troncoso et al., 2009).

El color ocupa un papel relevante, debido a que suele ser la primera propiedad que el consumidor observa antes de su apariencia y aspecto externo para poder aceptar un producto alimentario. A través de este atributo se valora un alimento antes de su compra y se ha demostrado su importancia en la sensación gustativa y olfativa (Fernández, 2008).

## 2.8 ANTECEDENTES

**Gangidi y Proctor, (2006).** Obtuvieron aceite de soya enriquecido con CLA después de un proceso de 144 h utilizando yodo como catalizador y una lámpara de luz UV como fuente de energía para llevar a cabo la isomerización. Determinaron que los factores más importantes para obtener un alto porcentaje de CLA son la distancia que existe entre la fuente de luz y el aceite, la agitación del aceite durante el proceso de isomerización y la correcta proporción de catalizador en relación al peso del aceite utilizado (0.15%). Partieron de aceite de soya ya que contiene un alto contenido de ácido linoleico y lograron un 24% de conversión.

**Lee et al., (2006).** Evaluaron la capacidad antioxidante y la estabilidad oxidativa de los lípidos estructurados a partir de aceite de oliva extravirgen y ácido linoleico conjugado. El presente estudio sugiere que el aceite de oliva puede ser una forma adecuada para incorporar CLA en la dieta humana. Sin embargo, la adición de un antioxidante adecuado sería necesaria para mejorar su estabilidad oxidativa.

**Solís-Ulloa, (2014).** Estudió el efecto del uso de 2 pretratamientos (congelado y deshidratación osmótica) en la absorción de aceite en chips de plátano macho (*Musa paradisiaca* var. AAB) y yuca (*Manihot esculenta* Crantz). Evaluó el efecto del uso del  $\text{CaCl}_2$  como pretratamiento a la deshidratación osmótica, llegó a la conclusión que en el caso de la yuca el  $\text{CaCl}_2$  facilitó la pérdida de agua y limitó la ganancia de sólidos. Realizó cinéticas de deshidratación osmótica de las rodajas de plátano macho y yuca utilizando 2 solutos osmóticos (sacarosa y NaCl), probando diferentes concentraciones y temperaturas, para las cuales obtuvo los tiempos de equilibrio. Utilizó estos tiempos de residencia para aplicar los pretratamientos y las rodajas obtenidas fueron sometidas a un primer freído a 170 °C por 2 min y congeladas a -20 °C por 5 días. Terminado este tiempo se sometieron a un 2° freído de 1.5 min. A estas chips se les evaluó la absorción de aceite para así determinar las condiciones que mejoraban la absorción del aceite en las chips, el autor eligió

las mejores condiciones de procesamiento para potenciar o mitigar la ganancia de aceite en las chips según fuera el caso.

**Sánchez-Ruíz, (2014).** Cuantificó el nivel de acrilamida y evaluó el efecto de la aplicación de pretratamientos (deshidratación osmótica y congelación), en las características físicas y químicas de chips elaboradas a partir de plátano macho y yuca durante el freído utilizando aceite de soya enriquecido con CLA. Las rodajas se sometieron a deshidratación osmótica (DO) con sacarosa al 30% a 40 °C por 20 min y 3% con NaCl al 3% a las mismas condiciones. Se realizó un primer freído a 170 °C posteriormente se congelaron por 5 días a -20 °C, para luego freírlas nuevamente. El aceite fotoisomerizado utilizado contenía 31.8% de CLA y se tomaron muestras a los 2, 4, 6, 8, 10, 12 y 14 min de freído. Se encontró acrilamida en un intervalo de 634 a 3177 µg/kg tanto para las chips fritas de plátano macho como las de yuca. Las mejores condiciones para la elaboración de las chips se eligieron tomando en cuenta como parámetro principal la cantidad de acrilamida formada, como segundo parámetro la cantidad de aceite y finalmente el color y la textura, siendo las mejores condiciones para la elaboración de chips de plátano macho y yuca el uso de un pretratamiento de DO con NaCl y 4 min de freído. Concluyendo que la acrilamida presente en las chips de yuca y plátano macho obtenidas con estas condiciones mostraron valores inferiores a los encontrados en chips comercializadas en la región de Tuxtepec.

## 2.9 JUSTIFICACIÓN

Día a día la demanda de frituras sanas y nutricionales ha ido en aumento, pero la mayoría de los aceites que son utilizados para la elaboración de estos productos fritos no son enriquecidos ni resistentes a la oxidación, la cual es causada por las altas temperaturas que se utilizan en el proceso de freído. Debido a esto se propone obtener un aceite de soya enriquecido con CLA y antioxidantes para la elaboración de “chips” de plátano macho y yuca, el cual podría sustituir las grasas comunes por el CLA. Donde el CLA puede servir como un modulador de grasa, evitando el enranciamiento y la oxidación del aceite. Permitiendo conservar los atributos

característicos del freído los cuales son indispensables para la aceptación de las frituras por parte de los consumidores.

## **2.10 OBJETIVOS**

### **2.10.1 Objetivo general:**

Evaluar la adición de un antioxidante (natural y sintético) sobre la estabilidad oxidativa y compuestos polifenólicos de chips modelo de plátano macho y yuca enriquecidas con ácido linoleico conjugado.

### **2.10.2 Objetivos específicos**

- Enriquecer el aceite de soya con ácido linoleico conjugado (CLA) mediante fotoisomerización.
- Adicionar el antioxidante natural (catequina) y el sintético (TBHQ) en el aceite de soya enriquecido con ácido linoleico conjugado.
- Evaluar los índices de estabilidad oxidativa primaria, secundaria y el valor totox del aceite antes y después del freído con y sin la adición de antioxidantes.
- Caracterizar físicamente las chips mediante el análisis de índice de oscurecimiento y textura.
- Cuantificar el contenido de CLA en chips de plátano macho y yuca con y sin la adición de antioxidantes (natural y sintético).
- Cuantificar el contenido de tocoferoles y fitoesteroles en el aceite isomerizado con y sin antioxidantes, sin isomerizar y después de un ciclo de freído.

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

### 3.1 Materia prima

#### 3.1.1 Aceite de soya

El aceite de soya fue proporcionado por la empresa Patrona S.A. de C.V., el cual se encontraba libre de antioxidantes sintéticos.

#### 3.1.2 Plátano macho

El plátano macho fue adquirido del mercado local de Tuxtepec, Oax., y se seleccionó de acuerdo a la etapa 2 de maduración tomando como referencia la escala Dole (©EPN-CIRAD).



Figura 6. Escala Dole (Gallegos, 2012).

#### 3.1.3 Yuca

Se utilizó yuca de la variedad *Manihot esculenta* Crantz en una madurez comercial, la cual se adquirió en un mercado local de la ciudad de Tuxtepec, Oax.

### 3.2 Obtención del aceite de soya enriquecido con CLA

Para la síntesis de CLA se llevó a cabo mediante un sistema de fotoisomerización a partir de aceite de soya en presencia de luz UV/visible con yodo como catalizador. La lámpara operó a 120 V, 60 Hz y 15 amperes.

Se pesó 500 g del aceite de soya y se mezcló durante 30 min, pasado este tiempo se calentó a 70 °C, después se le adicionó 0.15% de yodo y se sometió a agitación

hasta que el yodo se haya disuelto (color rojo/vino) y se llevó al sistema de irradiación. El sistema se conectó a un recirculador de agua y la temperatura del aceite se controló a 25 °C. El aceite se mantuvo en constante agitación durante la irradiación la cual duró por 144 h (Jain y Proctor, 2006). Posteriormente se realizó la remoción del yodo utilizando un proceso de adsorción mediante la metodología propuesta por Jain y Proctor, 2006.

### **3.2.1 Proceso de absorción para la remoción de yodo**

Después de la fotoisomerización del aceite durante las 144 h se retiró el aceite del sistema de fotoisomerización y posteriormente se le adicionó 1% de carbón activado y 1% de Celite en base al peso del aceite, se agitó durante 15 min con ayuda de una barra magnética hasta que la solución sea homogénea, después se filtró con la ayuda de la bomba de vacío con el fin de eliminar el yodo que se adicionó para llevar a cabo la fotoisomerización (Jain y Proctor, 2006).

### **3.3 Adición de los antioxidantes al aceite fotoisomerizado**

Se evaluó el efecto de la adición del antioxidante natural y sintético (catequina/TBHQ) sobre la estabilidad oxidativa del aceite enriquecido y sus cinéticas de deterioro. Una vez filtrado el aceite, es decir que ya se presente un color amarillo claro, se procedió a adicionar 0.2 gramos del antioxidante natural o sintético por cada 1000 gramos de aceite fotoisomerizado y se mezcló por 10 min para homogenizar la mezcla.

### **3.4 Preparación de las chips modelo de plátano macho y yuca**

#### **3.4.1 Pretratamiento de las chips de plátano macho y yuca**

El pelado de los plátanos se efectuó de manera manual con cuchillos, cortando primero los extremos y luego efectuando un corte poco profundo a lo largo, procurando no cortar la pulpa. El rebanado de los plátanos machos y yuca se realizó

cortando transversalmente la fruta en trozos de 1 mm de ancho con una rebanadora eléctrica (Díaz et al., 1996) y con un diámetro de 3.5 cm.

Se realizó un proceso de inmersión ( $\text{CaCl}_2$  al 3% durante 5 min) solo para la yuca. Las rodajas se sometieron a un tratamiento de deshidratación osmótica, en soluciones osmodeshidratantes de NaCl (3%) y sacarosa (30%) a una temperatura de 40 °C en una proporción muestra/solución 1:25. Las rodajas se mantuvieron hasta el equilibrio (20 min), es decir fueron determinados cuando la cinética de pérdida de agua y ganancia de sólidos presentó una reacción de primer orden (Solís-Ulloa, 2014), para posteriormente llevarse a cabo el proceso de freído.

#### **3.4.2 Condiciones de freído para las chips de plátano macho y yuca**

Las rodajas deshidratadas anteriormente se frieron durante 1 min a 170 °C, después se congelaron a -20 °C durante una semana. Finalmente fueron fritas durante 3 min a 170 °C para completar un tiempo total de freído de 4 min (Sánchez-Ruíz, 2014). Transcurrido ese tiempo las chips fueron retiradas del aceite y se tomaron aproximadamente 40 g de muestra del aceite usado para el análisis posterior, esto se llevó a cabo durante todos los ciclos de freído que se llevaron a cabo. Se utilizó el aceite de soya enriquecido con CLA con y sin antioxidantes para el freído de las chips. Por último las frituras se escurrieron para eliminar el exceso de aceite superficial del producto. En todos los tratamientos se utilizó 10 g de aceite por cada 1 g de chip (Ventura, 2010).

#### **3.5 Estabilidad oxidativa del aceite enriquecido**

Se determinó el índice de peróxidos, *p*-anisidina, y ácidos grasos libres de acuerdo a las técnicas descritas por la American Oil Chemistry Society (AOCS, por sus siglas en inglés) para grasas y aceites (AOCS, 2009), tanto en el aceite de soya enriquecido con CLA con y sin antioxidante natural y sintético como en el aceite de soya durante los seis ciclos de freído, utilizando como alimento para freír las chips modelo de plátano macho (Lee et al., 2006).

### 3.5.1 Índice de peróxidos

El índice de peróxidos se realizó de acuerdo al método Cd 8-53 de la AOCS (2009). Se pesó 5 g del aceite en un matraz Erlenmeyer y se adicionó 30 mL de la solución de ácido acético–cloroformo (3:2 v/v) y 0.5 mL de solución saturada de KI, se dejó reposar por 1 min. Pasado este tiempo se agregaron 30 mL de agua destilada y se realizó una titulación con solución de tiosulfato de sodio 0.1 N hasta que el color amarillo del yodo no se apreció, inmediatamente después se adicionaron 2.0 mL de indicador de almidón, se continuó la titulación hasta que el color azul desapareció. También se llevó a cabo una determinación de un blanco. Los cálculos se realizaron de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$I.P. = \frac{(S-B) \times N \times 1000}{m} \quad (2)$$

Donde:

I.P. = índice de peróxidos (miliequivalentes de peróxido/1000 g de muestra)

B = titulación del blanco, mL (0.01)

S = titulación de la muestra, mL

N = normalidad de la solución de tiosulfato de sodio

m = peso de la muestra (g)

### 3.5.2 Índice de *p*-anisidina

El índice de *p*-anisidina se determinó de acuerdo al método Cd 18-90 de la AOCS (2009). Se pesó 1 g de la muestra dentro de un matraz volumétrico de 25 mL y se aforó con Isooctano (Trimetilpentano) realizando el mismo procedimiento para todas las muestras. Posteriormente se midió la absorbancia ( $A_b$ ) de la solución en un espectrofotómetro a 350 nm donde se utilizó como blanco el solvente (Isooctano). Luego de realizar estas lecturas se tomó 5 mL de las soluciones que se aforaron en los matraces de 25 mL y se vaciaron en un tubo de ensaye respectivamente etiquetado cada uno de ellos y se agregó 1 mL de la solución de *p*-anisidina el cual posteriormente se agitó en el Vortex y se dejó reposar 10 min e inmediatamente se midió la absorbancia ( $A_s$ ) del primer tubo a 350 nm usando la

solución del segundo tubo de referencia como blanco, el blanco que se utilizó se realizó agregando 5 mL de Isooctano y 1 mL de la solución de *p*-anisidina; por último el índice de *p*-anisidina se calculó por la ecuación:

$$IA = \frac{25 \times (1.2A_s - A_b)}{m} \quad (3)$$

Donde:

$A_s$  = Absorbancia de la solución grasa, después de la reacción con el reactivo de la *p*-anisidina.

$A_b$  = Absorbancia de la solución grasa.

$m$  = Masa de la porción de la muestra en g.

### 3.5.3 Ácidos grasos libres

Los ácidos grasos libres presentes en la muestra se determinaron mediante el Método Oficial AOCS Ca 5a-40 el cual se describe a continuación:

Se pesó  $3.525 \pm 0.001$  de aceite en un matraz Erlenmeyer de 250 mL y se le agregó 100 mL de alcohol etílico al 99% neutralizado y 2 mL de fenolftaleína al 1% como indicador. Se tituló la mezcla con NaOH al 1N y se mantuvo en agitación vigorosa hasta que apareció un color rosa. El % de ácidos grasos libres se calculó con la ecuación siguiente:

$$\%AGL = \frac{mL NaOH * N * 28.2}{m} \quad (4)$$

Donde

% AGL: % de Ácidos grasos libres.

N: normalidad del hidróxido de sodio

M: peso de la muestra

### 3.6 Análisis del color

El color de los productos fue determinado con un colorímetro UltraScan® Vis (UVVIS) de la marca HunterLab y con el software EasyMatch QC. Las frituras de plátano macho y yuca fueron analizadas directamente en el colorímetro, se tomaron 3 lecturas equidistantes en cada chip y se evaluaron 5 chips de cada tiempo de freído. Los parámetros obtenidos fueron L\* la claridad o luminosidad y a\* y b\*. El cambio en el color fue determinado mediante el cálculo del Índice de Oscurecimiento (Serpen y Gokmen, 2009) con la siguiente formula:

$$IO = \frac{[100 \times (x - 0.31)]}{0.17} \quad (4)$$

$$x = \frac{(a * + 1.75 \times L *)}{(5.645 \times L * + a * - 3.012 \times b *)} \quad (5)$$

### 3.7 Textura

La textura se evaluó mediante un método de punción (PTP) con la finalidad de medir la fuerza de fractura (pico máximo de fuerza), mediante ensayos de penetración empleando una sonda cilíndrica de 2 mm (P/2N), obteniendo la fuerza máxima expresada en N (Newtons), las condiciones que se consideraron como óptimas, se realizaron 10 réplicas, habiendo seleccionado previamente los frituras de plátano y yuca más homogéneos. Las pruebas se realizaron en un texturómetro (TA-XT plus, Stable Microsystems Inc., Reino Unido). Se fijó una distancia de avance de 5 mm y velocidad de post-ensayo de 10 mm/s. Tanto la velocidad de pre-ensayo como la de ensayo fueron de 1.5 mm/s. La fuerza de ruptura está relacionada con el nivel de crujiencia de una fritura (Castro, 2008)

### 3.8 Extracción del aceite

Se homogenizó una muestra de 10 g de las chips pulverizadas con 10 mL de cloroformo y 20 mL de metanol durante 2 min, posteriormente se agregó 10 mL de agua destilada y se mantuvo en agitación por 30 seg más.

El homogenizado se filtró a través de un papel filtro Whatman No.1 en un embudo Büchner con una bomba de vacío, el residuo seco se mezcló nuevamente con 10 mL de cloroformo y volvió a filtrar, los recipientes se enjuagaron con 5 mL más de cloroformo. El filtrado se transfirió a un embudo de separación y se dejó reposar por unos minutos. El volumen de la capa del cloroformo se recuperó y la capa alcohólica se eliminó. El volumen de la capa clorofórmica se midió y se tomaron alícuotas de 10 mL que fueron colocadas en tubos de ensaye. Las alícuotas fueron evaporadas con nitrógeno gaseoso para obtener el peso del lípido en la alícuota y se procedió a calcular el contenido total de lípido con la siguiente fórmula (Moreno, 2002):

$$Total\ de\ lípidos = \frac{Peso\ del\ lípido\ de\ la\ alícuota \times Volumen\ de\ la\ capa\ de\ cloroformo}{Volumen\ de\ la\ alícuota} \quad (6)$$

### 3.9 Determinación del perfil de ácidos grasos.

La metilación de los ácidos grasos totales se llevó a cabo con una solución de HCl metanólico 1 N. La metilación de los ácidos grasos totales se llevó a cabo colocando alícuotas (100  $\mu$ L) de la muestra original en tubos de ensaye y adicionándoles 1 mL de HCl metanólico 1N durante 2 h a 60 °C. Las reacciones de derivatización se detuvieron con la adición de 100  $\mu$ L de agua y los ésteres de metilo formados se extrajeron con hexano (2 mL). A la fase orgánica tras una centrifugación, se le adicionó sulfato de sodio anhidro para eliminar la presencia de agua y posteriormente se inyectó 1  $\mu$ L de la muestra al cromatógrafo de gases. El equipo empleado fue un cromatógrafo de gases Agilent modelo 7820A, equipado con un detector de ionización de flama (FID) y una columna capilar HP Innowax de 60 m

de longitud, 0.25 mm de diámetro y un espesor de película de 0.25  $\mu\text{m}$ . Para efectuar la separación de los ésteres de metilo, la temperatura inicial del horno fue de 110 °C, la cual se incrementó en 4 °C/min y se mantuvo por 3 min hasta alcanzar 210 °C reteniendo la temperatura por 3 min y finalmente se incrementó la temperatura a 4 °C/min hasta llegar a 230 °C, condición que se mantuvo durante 11 min. La temperatura del puerto de inyección y el detector fueron ajustadas a 250 °C. Se usó nitrógeno de alta pureza como gas acarreador a un flujo constante de 1 mL/min (Sánchez-Ruiz, 2014) para la identificación de los ácidos grasos se inyectó un estándar de ácidos grasos marca SUPELCO y se compararon los tiempos de retención.

### **3.10 Cuantificación de tocoferoles y fitoesteroles**

Se realizó la cuantificación al aceite enriquecido con CLA y al de aceite de soya. Se utilizó un HPLC-APCI-IT MS. (Cromatografía líquida- ionización química a presión de iones-acoplada a masas) marca Waters, modelo Acquity de acuerdo al método reportado por Wissem et al., 2009 con algunas modificaciones.

100  $\mu\text{l}$  de aceite se disolvieron en 900  $\mu\text{l}$  de hexano. Las muestras se filtraron a través de un filtro de membrana (0.45  $\mu\text{m}$ ) antes de analizarlo por HPLC-APCI-IT MS.

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### 4.1 Composición del aceite de soya enriquecido con CLA y de aceite extraído de chips.

En la tabla 3 se observa el perfil de ácidos grasos del aceite de soya antes y después del proceso de fotoisomerización. En cuanto a la concentración total de CLA en el aceite después de 144 h de exposición fue de 22.05% para el aceite de soya fotoisomerizado. Para el aceite en las chips la concentración total de CLA fue solo del 20.05 y 19.54% para las chips de plátano macho y yuca, respectivamente.

Se han reportado diferentes porcentajes de concentración total de CLA mediante el proceso de fotoisomerización los cuales fueron de 24% y 20% respectivamente (Jain y Proctor, 2006; Yettella et al., 2011)

**Tabla 3.** Perfil de ácidos grasos del aceite de soya (%)

| Ácidos grasos          |       | Testigo                     | Isomerizado                 |
|------------------------|-------|-----------------------------|-----------------------------|
| A. Palmítico           | C16:0 | 0.17 ± 0.0010 <sup>b</sup>  | 0.30 ± 0.0160 <sup>a</sup>  |
| A. Esteárico           | C18:0 | 16.16 ± 0.3205 <sup>b</sup> | 19.99 ± 0.1195 <sup>a</sup> |
| A. Oleico              | C18:1 | 26.23 ± 0.1484 <sup>a</sup> | 21.33 ± 0.3263 <sup>c</sup> |
| A. Linoleico           | C18:2 | 50.61 ± 0.0341 <sup>a</sup> | 32.82 ± 0.5126 <sup>c</sup> |
| A. Linolenico          | C18:3 | 6.81 ± 0.1388 <sup>a</sup>  | 3.48 ± 0.0380 <sup>c</sup>  |
| A. Linoleico Conjugado | CLA   | -                           | 22.05 ± 0.7414 <sup>a</sup> |
| TOTAL                  |       | 100                         | 100                         |

Los valores representan la media de tres determinaciones ± desviación estándar.

Letras minúsculas diferentes entre filas del mismo ácido graso indican diferencia estadísticamente significativa ( $P < 0.05$ ).

Gammill (2010) reportó que estas variaciones en la obtención de CLA se debieron a que los aceites de soya usados tenían variaciones de componentes minoritarios (peróxidos, fosfolípidos, antioxidantes, ácidos grasos libres) y diferente grado de

refinamiento y esto afectó significativamente el rendimiento del proceso. También la temperatura ambiente pudo afectar este rendimiento debido a que en otros trabajos fue de 22 °C y en este trabajo fue de 30 - 33 °C aproximadamente.

El aceite de soya presentó un total de 83.65% de ácidos grasos insaturados, que coincide con lo reportado por Sánchez-Ruiz (2014).

El aceite de soya presentó 50.61 y 6.81% de ácido linoleico y linolénico respectivamente, después del proceso de fotoisomerización se vieron disminuidos estos porcentajes con 32.82 y 3.48% debido a la formación del CLA.

**Tabla 4.** Perfil de ácidos grasos del aceite extraído de las chips (%)

| Ácidos grasos          |       | Plátano macho               | Yuca                        |
|------------------------|-------|-----------------------------|-----------------------------|
| A. Palmítico           | C16:0 | ND                          | ND                          |
| A. Esteárico           | C18:0 | 20.09 ± 0.5762 <sup>c</sup> | 20.08 ± 0.8186 <sup>c</sup> |
| A. Oleico              | C18:1 | 22.13 ± 0.5073 <sup>b</sup> | 22.93 ± 0.1493 <sup>b</sup> |
| A. Linoleico           | C18:2 | 33.89 ± 1.7279 <sup>b</sup> | 33.89 ± 0.9190 <sup>b</sup> |
| A. Linolenico          | C18:3 | 3.82 ± 0.2609 <sup>b</sup>  | 3.54 ± 0.1733 <sup>c</sup>  |
| A. Linoleico Conjugado | CLA   | 20.05 ± 1.0302 <sup>a</sup> | 19.54 ± 0.1243 <sup>a</sup> |
| TOTAL                  |       | 100                         | 100                         |

Los valores representan la media de tres determinaciones ± desviación estándar.

Letras minúsculas diferentes entre filas del mismo ácido graso indican diferencia estadísticamente significativa ( $P < 0.05$ ). ND= No detectado

Durante el proceso de freído no hubo pérdida de CLA (tabla 4), ya que no hay diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) en el contenido de CLA en las chips, esto debido a los tiempos cortos de freído y la composición del aceite. La cantidad de ácidos grasos saturados aumentó un 4% después del proceso de fotoisomerización.

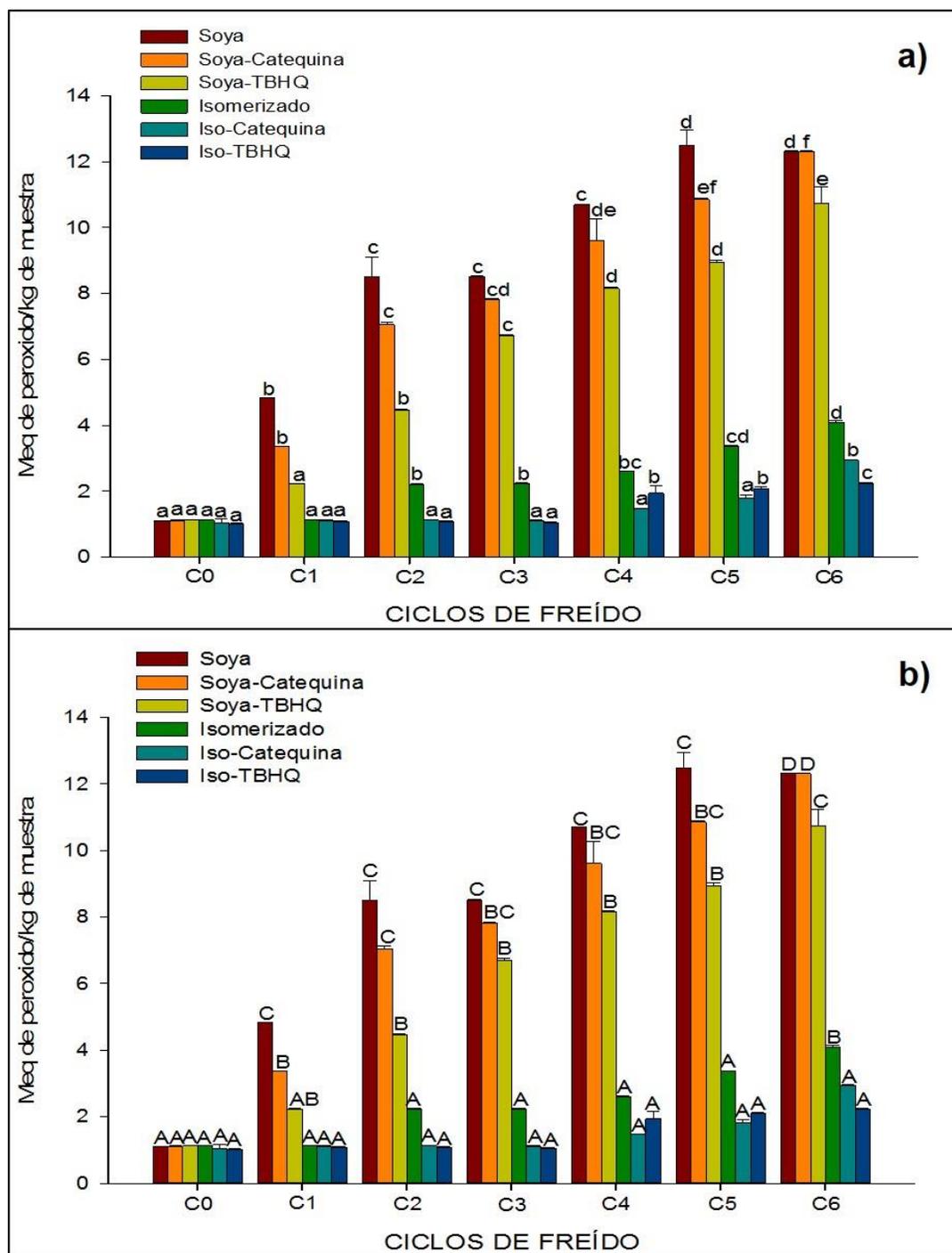
La humedad inicial de las rodajas de plátano macho y yuca pudo haber actuado como precursora para las reacciones de degradación del aceite, ayudando a la pérdida de ácidos grasos como el oleico, linoleico y linolénico. Estas variaciones entre la composición de ácidos grasos antes y después del proceso de freído puede explicarse estudiando la hidrólisis, la oxidación y polimerización del aceite, estas reacciones químicas son comunes en el aceite usado para freír y que producen compuestos volátiles y no volátiles. Tanto el agua, como el vapor y el oxígeno inician las reacciones químicas en el aceite de fritura y los alimentos (Dana et al., 2003).

## **4.2 Estabilidad oxidativa**

### **4.2.1 Índice de peróxidos**

El valor de peróxido define el contenido de hidroperóxidos lipídicos en aceites formados en condiciones de auto y fotooxidación. Es conveniente para medir la formación de hidroperóxidos en las fases tempranas de la oxidación.

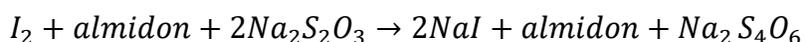
Todos los aceites en estudio (testigo e isomerizado) tienen un valor inicial de 1.1 meq O<sub>2</sub>/kg a pesar que el aceite isomerizado pasó por proceso de fotoisomerización. En todos los aceites (Figura 7a) se observó un incremento constante estadísticamente significativo en el índice de peróxidos a través de cada ciclo de freído, debido a que durante el proceso de freído el alimento se calienta repetidas veces a altas temperaturas, como consecuencia se produce un deterioro oxidativo del aceite originando productos volátiles que se eliminan parcialmente durante la fritura y nuevos compuestos no volátiles, que se acumulan en el aceite a medida que avanza el proceso de freído (Gallegos-Marín, 2012), pero se observó que en los aceites testigo con y sin antioxidantes se tienen valores superiores los cuales rebasan el nivel recomendado (10 meq O<sub>2</sub>/kg) a comparación de los aceites isomerizados los cuales se mantuvieron debajo de los 4 meq O<sub>2</sub>/kg. El aceite testigo fue el que mayor índice de peróxidos presentó en el ciclo 6 de freído siendo de 12.31 Meq O<sub>2</sub>/kg de muestra, el cual puede ser considerado como un aceite rancio. Mismo comportamiento fue observado por Gallegos-Marín en el 2012 donde el aceite testigo tuvo valores superiores al aceite isomerizado.



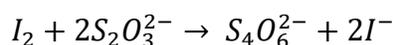
**Figura 7. Índice de peróxidos del aceite testigo e isomerizado con y sin antioxidantes después del freído.**

Los resultados son el promedio de tres determinaciones  $\pm$  desviación estándar. Letras diferentes minúsculas (a) en columnas del mismo color y mayúsculas (b) en columnas del mismo ciclo indican diferencia estadísticamente significativa entre ( $p < 0.05$ ).

Sin embargo no existe diferencia estadísticamente significativa entre el uso del antioxidante natural y el sintético en el aceite testigo y el isomerizado (Figura 7b). Estudios realizados por Yettella et al. (2012), sobre el índice de peróxidos en aceites isomerizados informan que los hidroperóxidos no son productos de oxidación del CLA, indicando la posible interferencia del yodo. Donde el yodo añadido puede haber afectado la determinación, teniendo la siguiente hipótesis. Cuando se añade yodo al aceite de soya para la producción de CLA, este se encuentra en forma molecular ( $I_2$ ). Luego, durante la irradiación, o cualquier exposición al calor o la luz se convierte en yoduro ( $I^-$ ). La ecuación química para la reacción es la siguiente:



Los peróxidos (ROOH) reaccionan con KI y dan como resultado la liberación de  $I_2$ . La solución se titula con unas gotas de tiosulfato de sodio y luego se añade almidón como indicador, que produce una coloración azul. La titulación con tiosulfato de sodio continúa hasta que el color azul desaparece. El principio de la determinación es la reducción de  $I_2$  a  $I^-$ :



Con la adición del  $I^-$  ya presente en el aceite, se necesita menos tiosulfato de sodio para reducir  $I_2$  a  $I^-$  y el valor de peróxidos es más bajo.

#### 4.2.2 Índice de *p*-anisidina

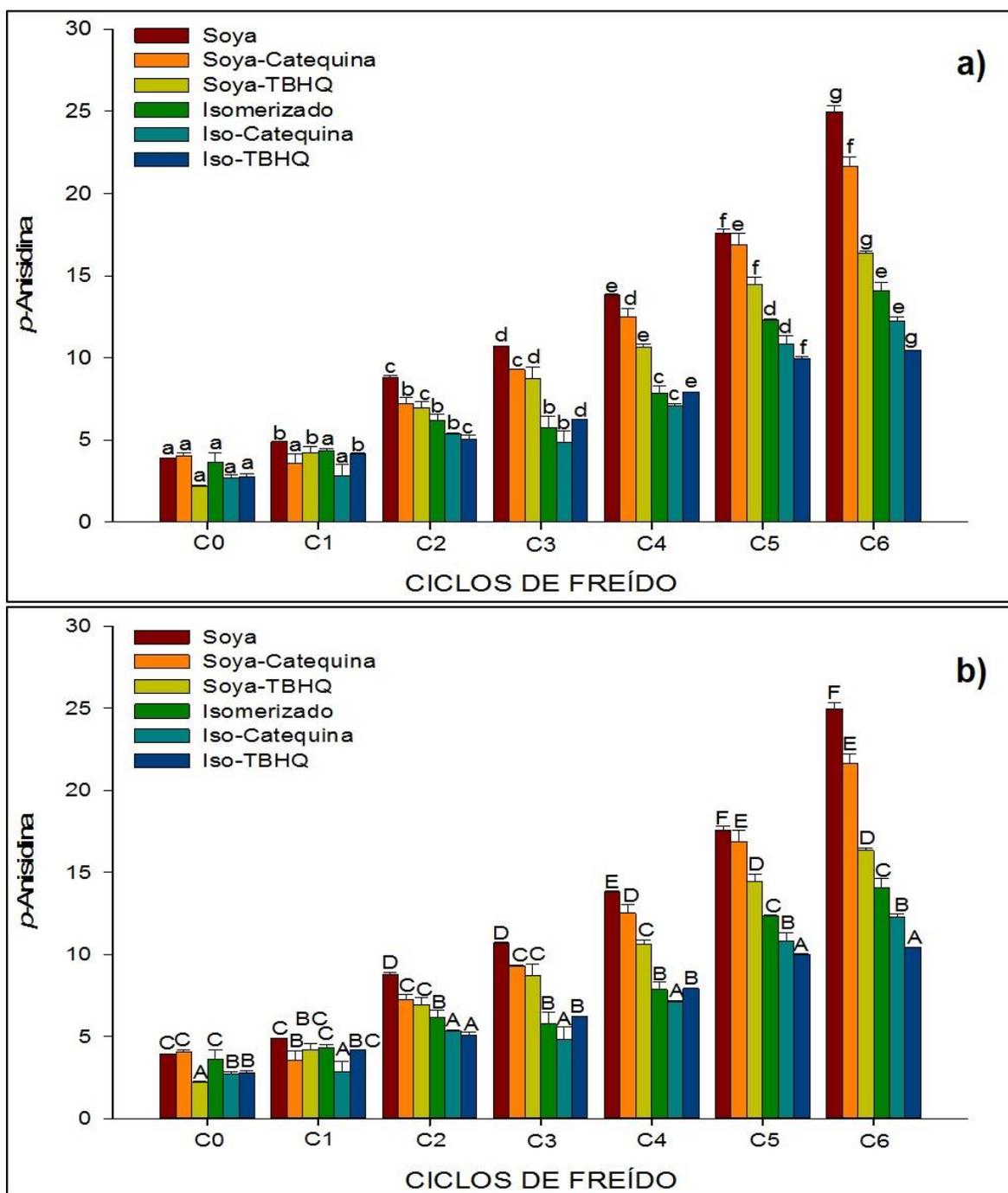
Los resultados de *p*-anisidina se realizaron con el fin de determinar la presencia de productos de oxidación secundaria. A diferencia de los hidroperóxidos, los aldehídos no se descomponen rápidamente, así permiten conocer el pasado de un aceite (Shahidi y Wanasundara, 2002)

Los compuestos medidos por el índice de *p*-anisidina son de suma importancia ya que es posible que entre ellos se encuentren aldehídos oxigenados tóxicos, conocidos por su actividad cito y genotóxica y probables causantes de enfermedades degenerativa. En otras investigaciones se ha informado que los aceites ricos en ácidos grasos poliinsaturados, como el aceite de soya, pueden tener valores de *p*-anisidina entre 1 y 10 (López-Aguilar et al., 2006).

En la Figura 8 se tienen los resultados del índice de *p*-anisidina, el cual representa los productos de oxidación secundaria, se observa que todos los aceites tienen un aumento progresivo en cada ciclo de freído.

En el ciclo 0, el aceite testigo e isomerizado no presentan diferencia estadísticamente significativa, a pesar que el aceite isomerizado fue sometido a un proceso de fotoisomerización, esto debido a que en el aceite de soya isomerizado no solo fueron removidos productos de oxidación primaria mediante la filtración con carbón activado y celite sino que también se removieron productos de oxidación secundaria como aldehídos y cetonas.

Se observa diferencia estadísticamente significativa ( $P < 0.05$ ) entre el uso del antioxidante natural y sintético en el aceite isomerizado desde el primer ciclo de freído, teniendo los valores más bajos utilizando el antioxidante sintético, esta diferencia no se observó en el índice de peróxidos, esto debido a que los hidroperóxidos no son muy estables y rápidamente son convertidos a productos de oxidación secundaria.



**Figura 8. Índice de *p*-Anisidina del aceite testigo e isomerizado con y sin antioxidantes después del freído.**

Los resultados son el promedio de tres determinaciones  $\pm$  desviación estándar. Letras diferentes minúsculas (a) en columnas del mismo color y mayúsculas (b) en columnas del mismo ciclo indican diferencia estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ).

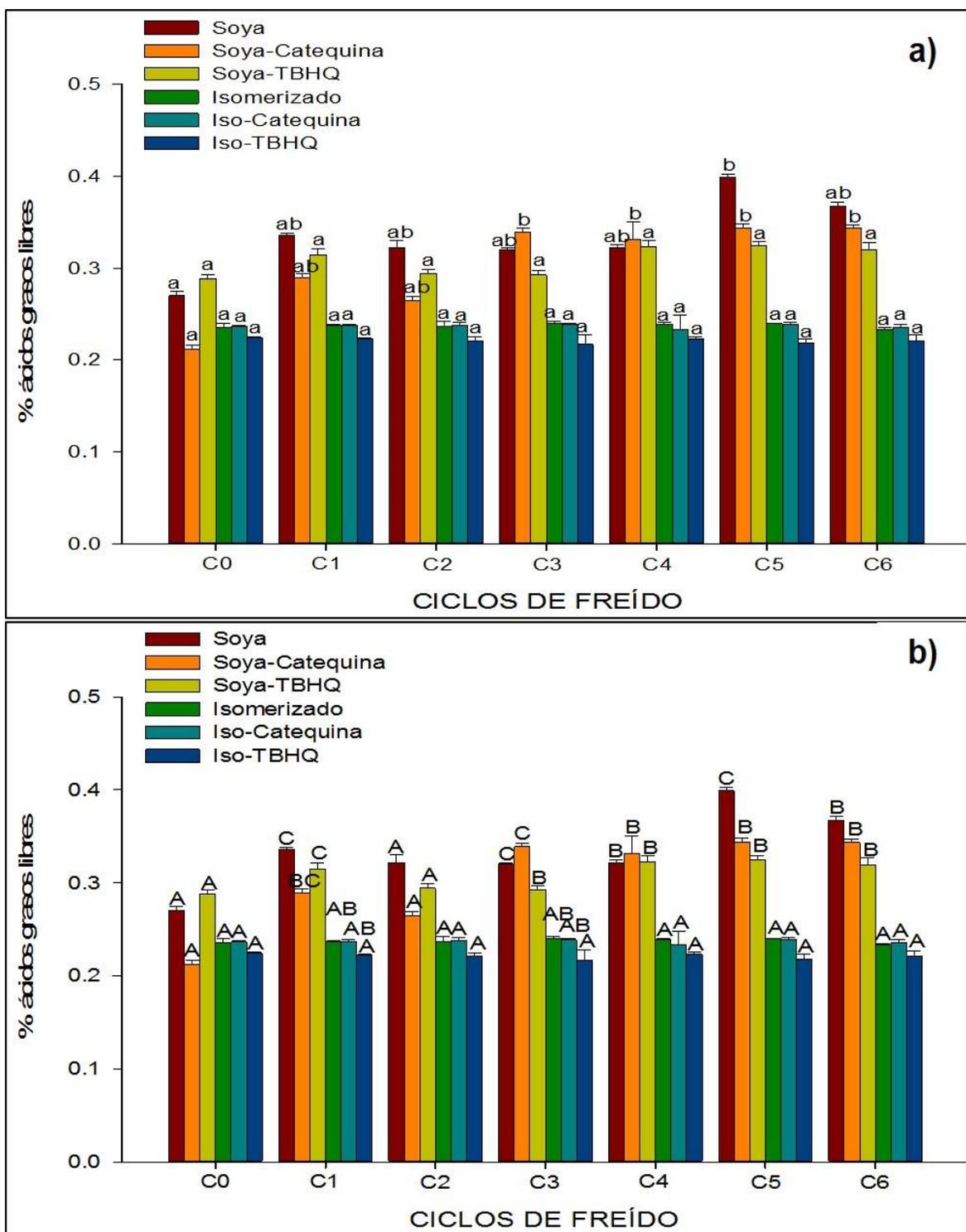
Los tratamientos con aceite isomerizado se encuentran por debajo del valor permitido (14), mientras que los testigos después del ciclo 4 sobrepasan el índice recomendado. El uso del antioxidante sintético disminuyó el valor de *p*-anisidina en los seis ciclos de freído. Pérez-Osorio (2012) y Porragas-Celaya (2012) realizaron una investigación utilizando antioxidantes sintéticos (BHA, Mexenil 15) en aceite de soya isomerizado reportando que el uso de estos antioxidantes mejora la estabilidad oxidativa disminuyendo los productos de oxidación secundaria.

Al comparar los resultados anteriores con los obtenidos en la determinación del índice de peróxidos, se observa que el aumento de *p*-anisidina coincide en el tiempo con los cambios en la evolución del índice de peróxidos. Así, cuando los hidroperóxidos responsables de la oxidación primaria se descomponen formando compuestos carbonilos (aldehídos, cetonas, ácidos de bajo o medio peso molecular y otros productos oxigenados), se produce una disminución del índice de peróxidos y un aumento del valor de *p*-anisidina.

#### **4.2.3 Ácidos grasos libres**

La medida de los ácidos grasos libres permite evaluar el estado general de enranciamiento de un alimento ya que usualmente el enranciamiento hidrolítico acompaña el enranciamiento oxidativo. Donde los ácidos grasos pueden provenir de una rancidez hidrolítica donde parte de los ácidos grasos no se reacomodan, pudiendo medirse como ácidos grasos libres.

En la Figura 9a se encuentran los porcentajes de los ácidos grasos libres donde en el ciclo 0 los aceites testigo e isomerizados no muestran diferencia estadísticamente significativa ( $p < 0.005$ ) demostrando que la fotoisomerización no afecta la calidad del aceite.



**Figura 9. Ácidos grasos libres del aceite testigo e isomerizado con y sin antioxidantes después del freído.**

Los resultados son el promedio de tres determinaciones  $\pm$  desviación estándar. Letras diferentes minúsculas (a) en columnas del mismo color y mayúsculas (b) en columnas del mismo ciclo indican diferencia estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ).

Los aceites isomerizados muestran mayor estabilidad ya que durante los seis ciclos no hay diferencia estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ). El aceite testigo con antioxidante sintético (TBHQ) muestra el mismo comportamiento de los isomerizados, mientras que el aceite testigo y el aceite con antioxidante natural (catequina) muestran diferencia estadísticamente significativa a partir del primer ciclo de freído.

En la Figura 9b, se observa que no existe diferencia significativa entre la utilización de los antioxidantes en los aceites isomerizados.

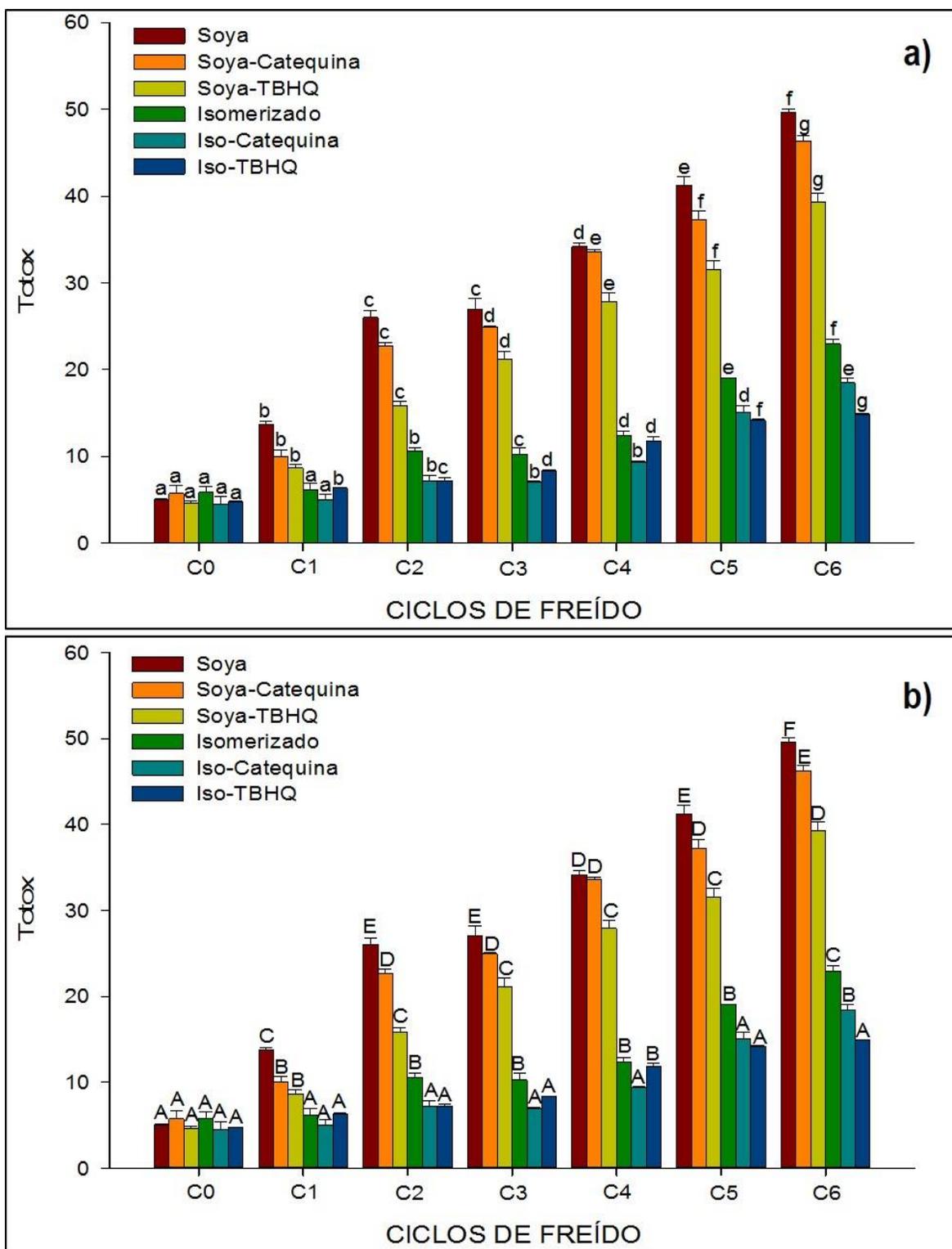
Sin embargo, todos los valores se encuentran entre 0.2 y 0.3% de ácidos grasos libres los cuales permanecen dentro de los estándares recomendados para aceites desodorizados que oscila entre 0.3 - 0.5% según la Norma Oficial Mexicana, 1985 y Lopez-Aguilar et al. (2006) y de los estándares internacionales de la Unión Europea y los Estados Unidos que indican un límite máximo de 1.0 para ser aceptado (Linaldi-Romero, 2015).

#### **4.2.4 Valor totox**

El valor de totox estima la estabilidad oxidativa del aceite incluyendo valores de peróxido y *p*-anisidina del aceite; que son los compuestos oxidativos primarios y secundarios, debido a esto en este estudio se observa una tendencia similar a los resultados de estos índices, proporcionando una mejor estimación del deterioro oxidativo progresivo del aceite a través de los ciclos de freído.

En la Figura 10a se observa que no hay diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) en los aceites testigo e isomerizados antes del freído.

A través de los seis ciclos de freído hay un incremento en los valores totox para todos los aceites, encontrándose valores significativamente ( $p < 0.05$ ) menores (5 - 20) debido a que como se mencionó anteriormente el aceite isomerizado es más estable durante el freído ya que durante el proceso de remoción del yodo se eliminan los productos de oxidación primaria y secundaria asegurando un aceite con mayor estabilidad ya que bajar el valor de totox, mejora la calidad del aceite según Wai et al. (2009).



**Figura 10. Valor ttox del aceite testigo e isomerizado con y sin antioxidantes después del freído.**

Los resultados son el promedio de tres determinaciones  $\pm$  desviación estándar. Letras diferentes minúsculas (a) en columnas del mismo color y mayúsculas (b) en columnas del mismo ciclo indican diferencia estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ).

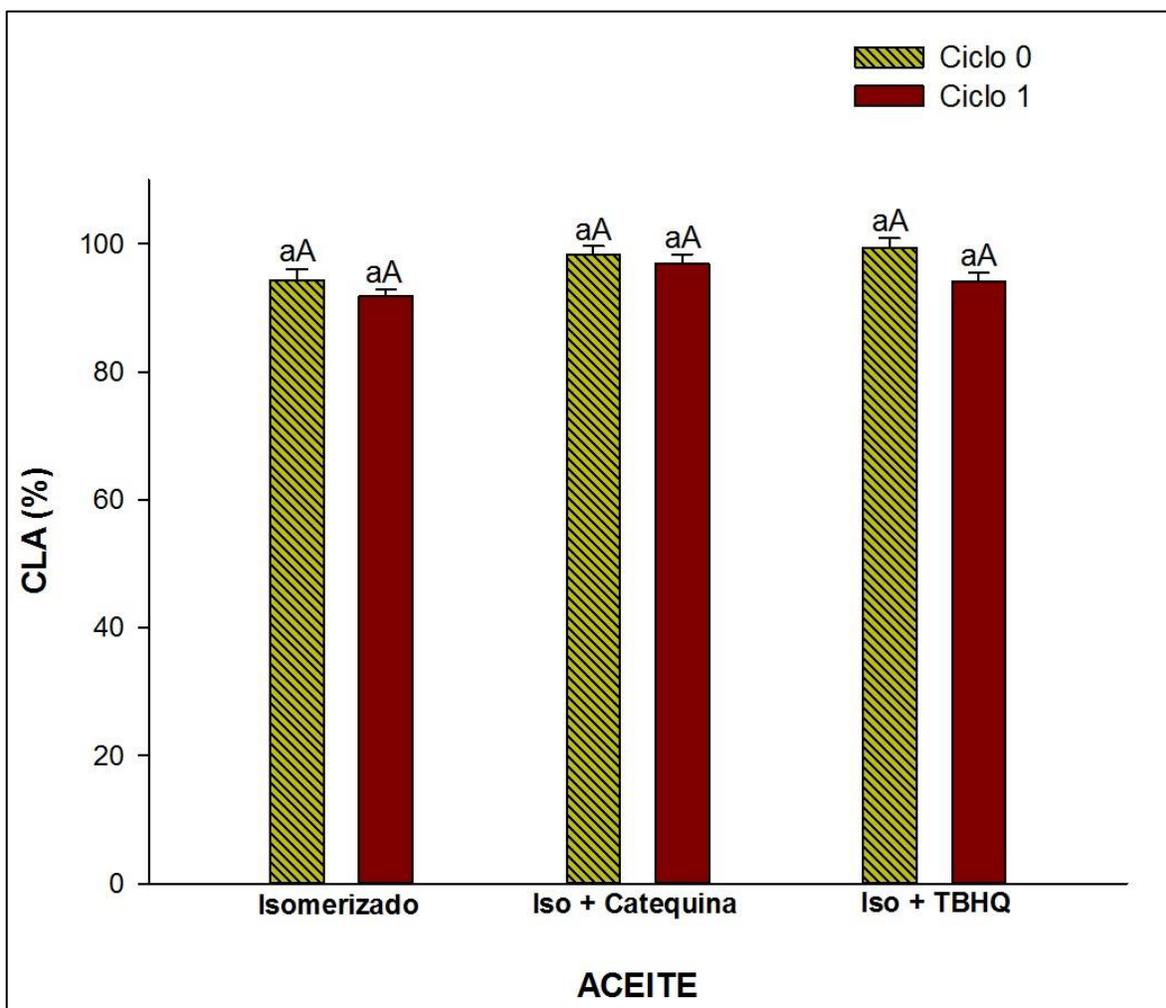
El valor tottox máximo (49.6) fue alcanzado por el aceite testigo sin antioxidantes. Se observa en la figura 10b, que hay diferencia estadísticamente significativa entre el uso del antioxidante natural y el sintético para todos los aceites.

#### **4.3 Pérdida de CLA después de un ciclo de freído**

En la figura 11 se observa que la concentración de CLA se mantiene constante después de un ciclo de freído en el aceite isomerizado con y sin antioxidantes, esto debido al poco tiempo de freído que se utilizó, a pesar de que la estabilidad térmica de los aceites depende de su estructura química. Ya que los aceites saturados son más estables que los insaturados. Los ácidos grasos insaturados son los principales precursores de los compuestos volátiles que se encuentran en los aceites oxidados. El ácido linolénico es un ácido graso insaturado esencial para la salud que se pierde rápidamente en el proceso de fritura, alterando el equilibrio entre ácidos grasos saturados e insaturados en el aceite, y el aumento de la formación de mal sabor (Gallegos-Marín, 2012)

Los usos del aceite durante un largo tiempo y/o su reutilización conducen a la formación y acumulación de sustancias indeseables. Estos compuestos pueden estar relacionados con la liberación y la disolución de las partículas de alimentos, o productos de reacciones térmicas y oxidativas en el aceite. Todos estos factores contribuyen a aumentar la viscosidad del aceite, disminuir la tensión superficial entre el alimento y el aceite, y aumentar el suministro de aceite en la superficie de los alimentos, lo que facilita su absorción.

A pesar de esto no hay diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) con respecto al CLA, esto coincide con los resultados mostrados anteriormente en la estabilidad oxidativa ya que después de un ciclo de freído los aceites isomerizados con y sin antioxidantes se mantienen sin cambios significativos en el índice de peróxidos, *p*-anisidina, ácidos grasos libres y valor tottox.



**Figura 11. Resultados de la pérdida de CLA después de un ciclo de freído.**

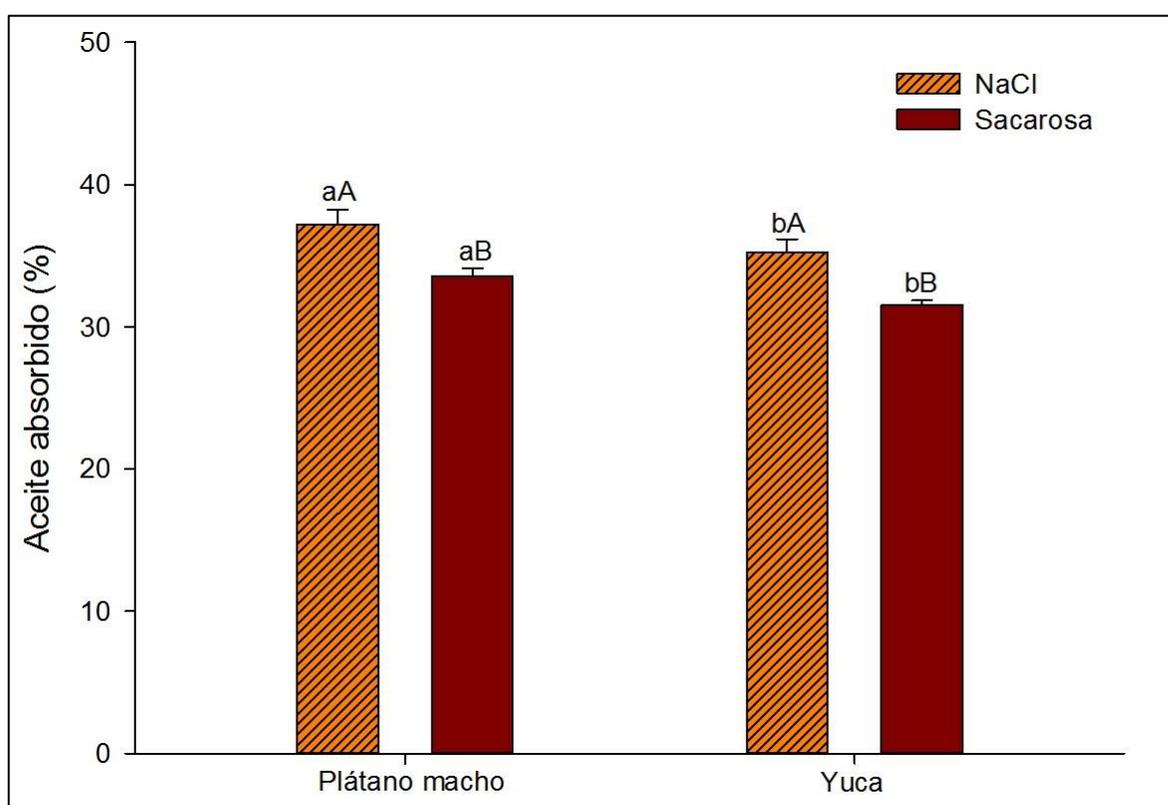
Los resultados son el promedio de tres determinaciones  $\pm$  desviación estándar. Letras minúsculas diferentes entre columnas del mismo color y mayúsculas entre columnas del mismo tratamiento indican diferencia estadística significativa ( $p < 0.05$ ).

#### 4.4 Aceite y CLA absorbido por las chips

La incorporación o la absorción de aceite dependen de la calidad inicial y el tipo de aceite o grasa que se utiliza. Muchos factores afectan a la penetración del aceite en los alimentos, tales como la forma geométrica, la viscosidad del aceite, tipo de alimento, la temperatura del aceite, y la duración de la fritura.

Los porcentajes del aceite absorbido por las chips de plátano macho con NaCl y sacarosa fueron de 37.22 y 33.55 %, y para las chips de yuca 35.22 y 31.54 % respectivamente; estos valores se encuentran dentro del intervalo de 23 - 43% de aceite absorbido por las chips comercializadas en la ciudad de Tuxtepec, de acuerdo a la investigación realizada por Sánchez-Ruiz (2014).

De ese 37% de aceite el 7.43% pertenece a las grasas saturadas, el 22.24% de las grasas insaturadas y el 7.33% de CLA.



**Figura 12. Porcentaje de aceite absorbido por las chips.**

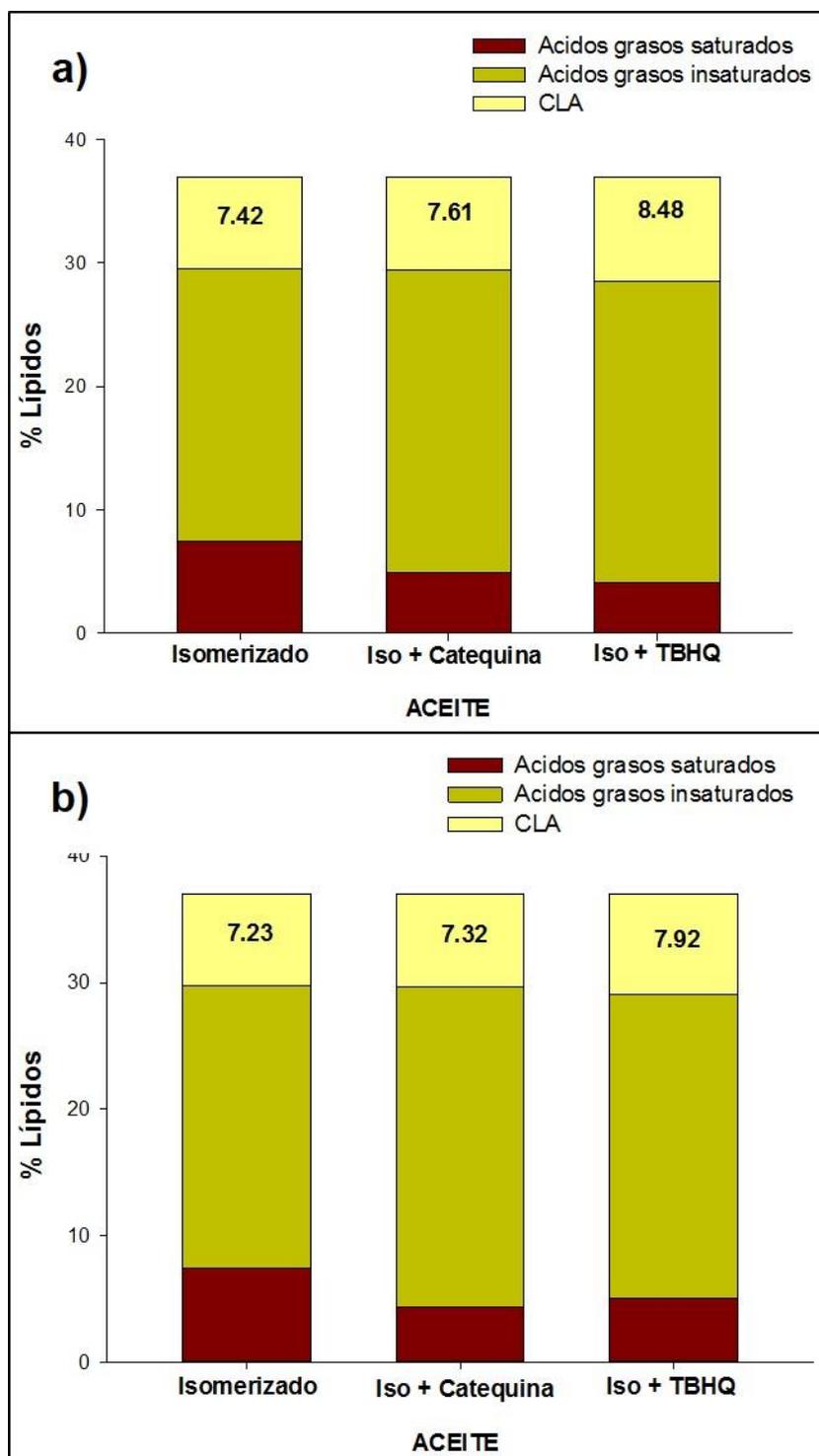
Los resultados son el promedio de tres determinaciones  $\pm$  desviación estándar. Letras minúsculas diferentes entre columnas del mismo tratamiento y mayúsculas entre columnas del mismo color indican diferencia estadística significativa ( $p < 0.05$ ).

Se observa que el uso de sacarosa tanto para las chips de plátano macho y yuca si afecta, teniendo la menor cantidad de aceite absorbido, esto debido a que según

Solís-Ulloa (2014) las chips de sacarosa tienen mayor ganancia de sólidos, lo que conlleva a una menor cantidad de agua, la cual al ser sustituida por el aceite llega a ser menor, además que al incrementar la concentración de la solución osmótica la absorción de aceite fue disminuyendo, este mismo comportamiento fue reportado por Krokida et al. (2001) en cilindros de papa, ya que al aplicar la DO con solución de azúcar se presentó menor absorción de aceite comparadas con los cilindros de papá deshidratados con soluciones de NaCl, de la misma manera Moyano y Berna (2002), reportaron el mismo comportamiento en papas a la francesa. Esto es debido a cambios en la estructura superficial de las muestras, que pueden afectar la permeabilidad de las mismas a la hora de ser sometidas al proceso de freído tal como lo reporta Moreno y Ouchon (2008).

En las gráficas de CLA absorbido por las chips (Figura 13) se observa que no existe diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre el uso de la solución osmótica (NaCl y sacarosa).

La mayor cantidad de CLA retenido en las chips se presentó en el aceite con antioxidantes (catequina/TBHQ), debido a que hubo menor formación de productos de oxidación que afectaron a la estabilidad del aceite durante el proceso de fritura. Se observa una misma tendencia entre el uso de chips de yuca y de plátano macho, por lo tanto la utilización de la materia prima no es un factor que afecte a la absorción de CLA.



**Figura 13. Porcentaje de CLA absorbido en las chips de (a) plátano macho y (b) yuca.**

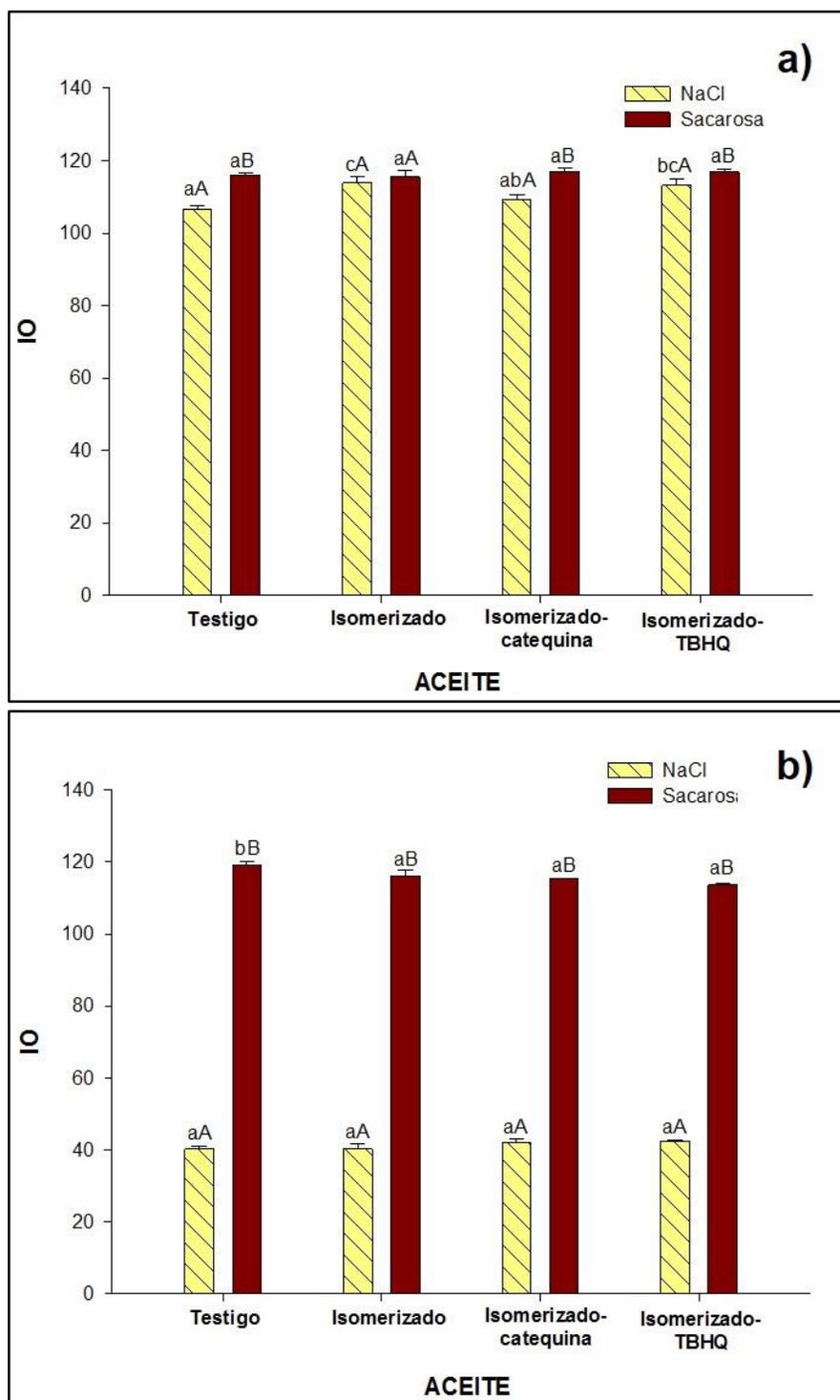
Los resultados son el promedio de tres determinaciones.

#### 4.5 Índice de oscurecimiento (IO) de las chips

Las condiciones a las que los alimentos se presentan durante el proceso de fritura causan el desarrollo de cambios físicos y químicos que dependen de la composición del alimento, y afectan el desarrollo de color, sabor, además de cambiar la textura del alimento.

Cuando el alimento se sumerge en aceite caliente en presencia de O<sub>2</sub>, el aceite se expone a tres agentes que causan cambios en su composición: agua de los alimentos (que causa cambios hidrolíticos), oxígeno (que entra en contacto con el aceite y causa cambios de oxidación desde la superficie hasta el interior de los alimentos) y, finalmente, la temperatura alta (que causa cambios térmicos, tales como isomerización y reacciones de escisión - aldehídos y cetonas - que forman diversos productos de degradación, como epóxidos e hidroperóxidos (Bordin et al., 2013). Las características de color y sabor de los productos fritos también son desarrollados por una combinación de reacciones y compuestos absorbidos por el aceite de fritura. Los principales factores que afectan a los cambios en el color y el sabor durante el proceso son: tipo de aceite, de almacenamiento y térmicas, la tensión interfacial entre el aceite y el producto, la temperatura y la duración del freído, el contenido de humedad, el tamaño y las características de superficie de los alimentos y pre- tratamientos de freído.

En la Figura 14 se muestran los valores de IO registrados para las chips de yuca con NaCl y sacarosa (40 a 42 y 113 a 117) los cuales fueron menor a los valores obtenidos en las chips de plátano macho (106 a 113 y 115 a 117); esto se debe a la naturaleza de cada materia prima, ya que el plátano macho es susceptible a la oxidación, dando diferente coloración en cada una de las rodajas de plátano macho antes de ser freídas.



**Figura 14. Índice de oscurecimiento (IO) en las chips de (a) plátano macho y (b) yuca.**

Los resultados son el promedio de tres determinaciones  $\pm$  desviación estándar. Letras minúsculas diferentes entre columnas del mismo color y mayúsculas entre columnas del mismo tratamiento indican diferencia estadística significativa ( $p < 0.05$ ).

Las chips de plátano macho (Figura 14a) y las chips de yuca (Figura 14b) con sacarosa tienen los valores más altos siendo más oscuras. Esto es causado por la caramelización y/o reacción de Maillard. Durante el freído, esta es la reacción principal que afecta a los azúcares que implica grupos aminos libres de los aminoácidos, péptidos, proteínas, y los grupos carbonilo u otros aldehídos y cetonas de azúcares. Varios productos intermedios, llamados productos de Amadori o pre-melanoidinas, se polimerizan rápidamente a temperaturas de freído, formando moléculas de color oscuro (melanoidinas). El pardeamiento es más rápido a temperaturas superiores a 150 °C (Bordin et al., 2013).

Las chips de yuca en las cuales se utilizó NaCl como solución osmótica presentaron los valores más bajos en oscurecimiento (50) siendo las chips más claras esto debido a las características del alimento, que cuenta con un mayor contenido de carbohidratos, ya que la aplicación de una temperatura alta, superior al punto de gelatinización del almidón 61.8 °C permite que este pierda su cristalinidad y se hinchen los gránulos por el rompimiento de los puentes de hidrógeno y que tenga un efecto en el mejoramiento del color debido a la disminución de los azúcares reductores que participan en la reacción de Maillard (Urbano, 2012).

Congelar las chips también pudo haber contribuido a la formación de color en ambas chips, la temperatura de congelación usada favoreció la formación de cristales de hielo en el interior de la matriz del alimento, estos cristales rompieron las paredes celulares permitiendo la disponibilidad a la reacción de Maillard de aminoácidos y azúcares presentes en el interior de las células.

El uso de aceite de soya fotoisomerizado con y sin antioxidantes no afectó significativamente la formación de color en ninguna de las chips obtenidas.

#### **4.6 Textura de las chips**

En la Figura 15a y b se muestran los resultados de textura en la cual se analizó la fuerza de fractura de las chips. Para las chips de plátano macho (Figura 15a) con

NaCl y aceite isomerizado con y sin antioxidante se observa que la textura crujiente es similar a las freídas con aceite testigo. Para las frituras con sacarosa, muestran el mismo comportamiento ya que las chips freídas con aceite isomerizado tienen el mismo nivel de fracturabilidad que las freídas con aceite testigo.

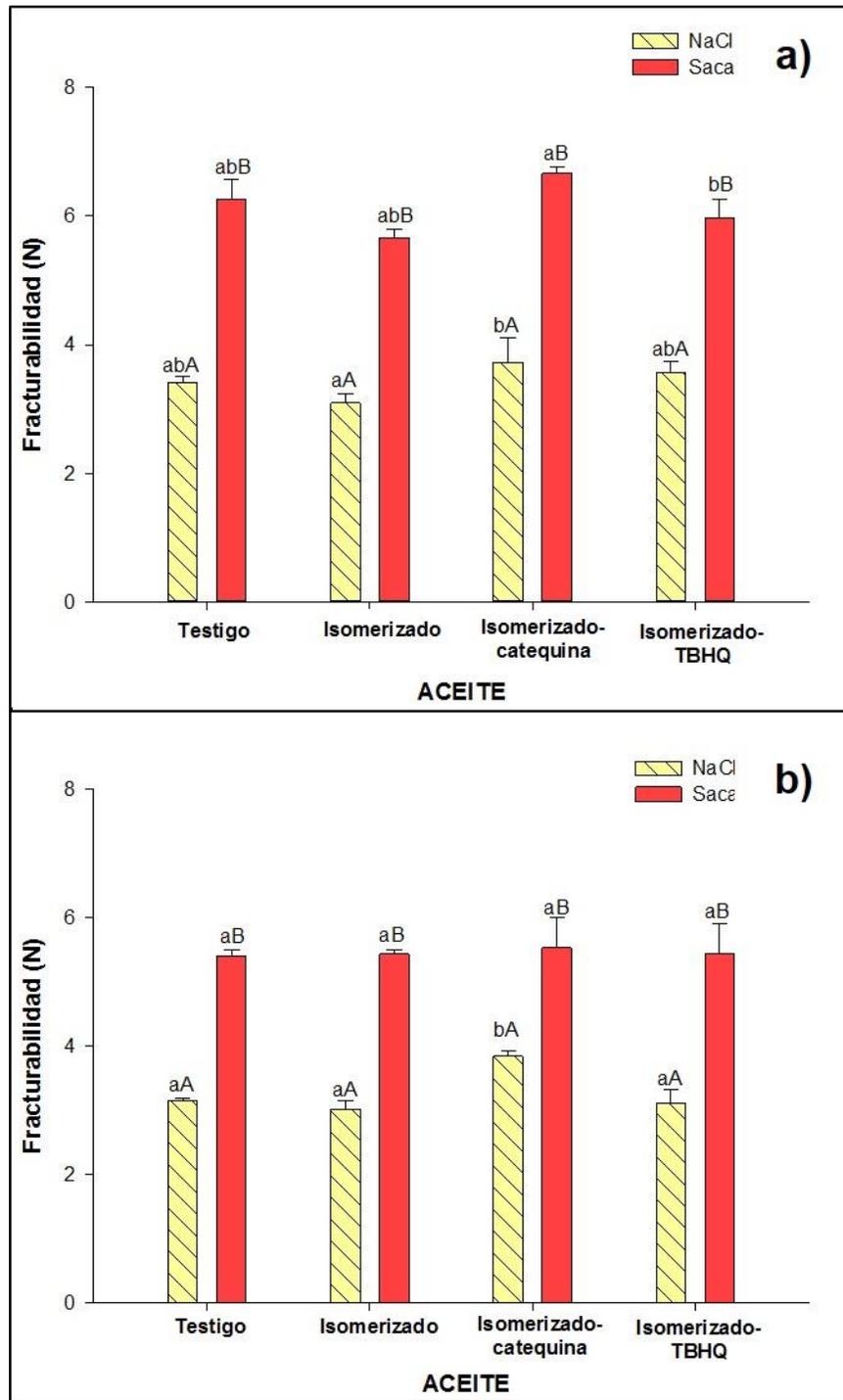
Los datos también mostraron una gran variabilidad, esto pudo deberse a la distribución de sólidos, la relación aceite/poros y los patrones de fritura de la corteza las cuales contribuyeron a la variabilidad en la textura de las chips.

En la Figura 15b con las chips de yuca no existe diferencia entre las freídas con aceite testigo y aceite isomerizado para las chips con sacarosa. Pero si hay una diferencia entre el uso de plátano macho y yuca y esto se debe a la textura no homogénea inherente del plátano macho y la estructura de las frituras tratadas con pre-tratamiento, ya que las formas y tamaños estructurales se desequilibran después del freído (Ikoko et al., 2007).

Por lo tanto el aceite isomerizado no afectó la textura de las chips tanto de plátano macho como de yuca.

Las chips de plátano macho presentaron mayor resistencia siendo más firmes en comparación con las chips de yuca. Para ambas frituras se muestra diferencia entre el uso de la solución osmótica teniendo mayor fuerza de fracturabilidad las chips con sacarosa ya que los cambios en la superficie de los alimentos pueden ser causados por la caramelización y/o reacción de Maillard, así como la evaporación del agua de la superficie, que caracteriza la formación de costras, responsable de la textura de los alimentos fritos (Bordin et al., 2013).

Según Fellows (2004), el desarrollo de la textura interior de los alimentos durante el proceso de freído es el resultado de la combinación de cambios en las proteínas, grasas y polímeros de carbohidratos similares a los que ocurren durante la ebullición. El desarrollo de los poros es un cambio estructural importante. Los poros se forman por evaporación del agua y la formación de capilares.



**Figura 15. Fuerza de fractura de las chips de (a) plátano macho y (b) yuca.**

Los resultados son el promedio de tres determinaciones  $\pm$  desviación estándar. Letras minúsculas diferentes entre columnas del mismo color y mayúsculas entre columnas del mismo tratamiento indican diferencia estadística significativa ( $p < 0.05$ ).

El calor intenso conduce a la explosión durante la evaporación del agua, creando amplios poros. Una corteza superficial se forma rápidamente, actuando como una barrera a la evaporación, disminuyendo la pérdida de agua y manteniendo el interior de la humedad de los alimentos.

La gelatinización del almidón y desnaturalización de las proteínas también contribuyen al desarrollo de poros y la contracción de los alimentos debido a que el almidón gelatinizado está generalmente disperso en la fase continua formada por desnaturalización de las proteínas. Según Ngadi y Xue (2009), la presencia de poros afecta las propiedades mecánicas de los alimentos y, en consecuencia, su textura y aceptabilidad. La estructura de una proteína es el resultado de varias interacciones intermoleculares de atracción y repulsión, tales como la interacción de los grupos de proteínas con agua. Los cambios en las condiciones estructurales naturales de la proteína pueden ser resultado de los cambios en la temperatura, pH, tensión superficial, presencia de sal, y otros agentes que interrumpen las interacciones intra e intermoleculares, provocando cambios en la estructura y rompiendo la proteína en las cadenas de aminoácidos. Estos aminoácidos pueden formar agregados esféricos que interactúan y se originan de la red de gel.

#### **4.7 Efecto de la fotoisomerización sobre la estabilidad de los tocoferoles**

Los tocoferoles son un grupo de antioxidantes primarios principales presentes en los aceites vegetales, previniendo la peroxidación de lípidos mediante la eliminación de radicales en partículas de membrana y lipoproteínas (Ghosh et al., 2012).

El contenido total de tocoferoles antes del proceso de fotoisomerización es de 1030.47 mg/L, lo cual coincide con lo reportado por Medina-Juárez et al. 2000 y Gallegos-Marín,(2012), observando que el proceso de fotoisomerización no afecta el contenido de tocoferoles ya que no hay diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) en el total de estos.

El efecto de la luz UV sobre la degradación de los  $\alpha$ -,  $\gamma$ - y  $\delta$ -tocopheroles en el aceite de soya durante la fotoisomerización se presenta en la tabla 5. Después de 144 h

de fotoisomerización, los  $\delta$ -tocoferoles se degradaron, mientras que el  $\alpha$ - y  $\gamma$ -tocoferol se mantuvieron sin diferencia significativa ya que la luz UV no tuvo un efecto negativo significativo sobre la estabilidad del  $\gamma$ -tocoferol, mismo efecto se observó en la investigación de Gallegos-Marín (2012) y en el de Yettella et al. (2013).|

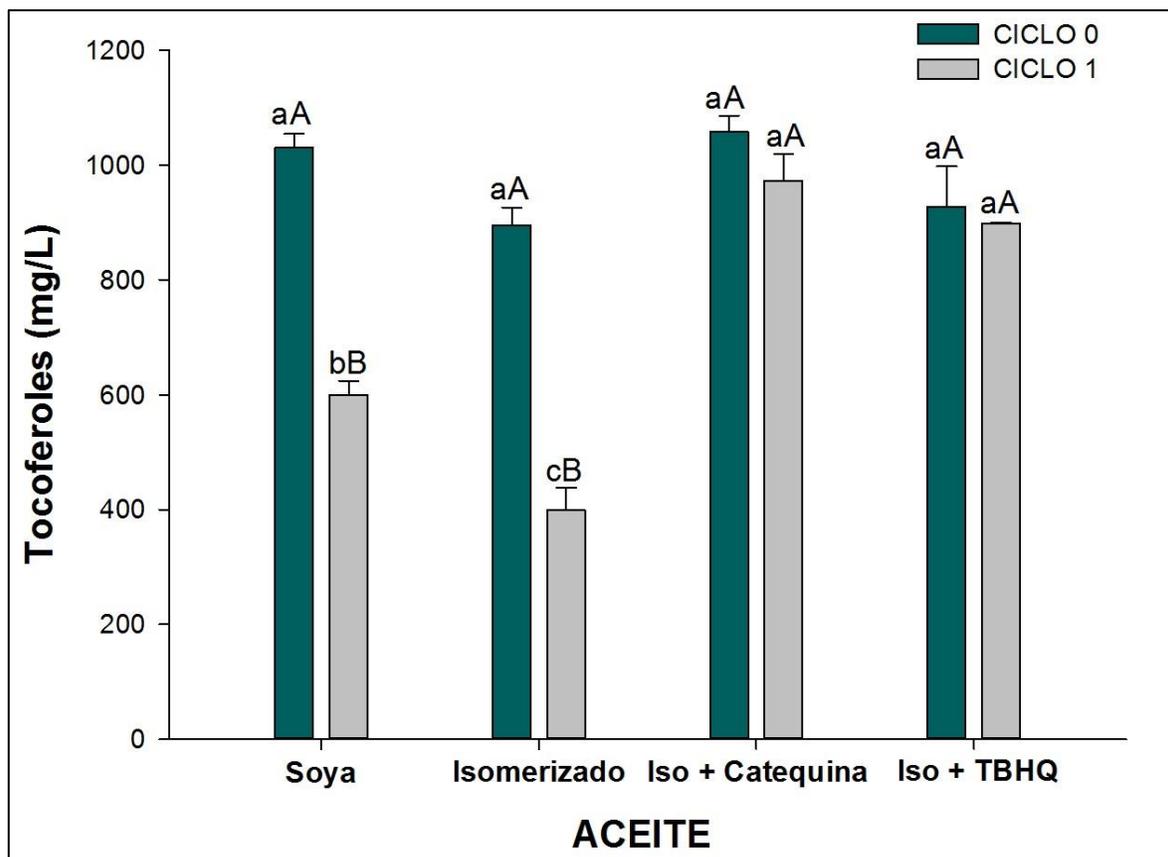
**Tabla 5. Contenido de tocoferoles (mg/L) en el aceite de soya.**

| Aceite      | Soya                        | Soya iso                    | Soya iso-Catequina          | Soya iso-TBHQ              |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| $\alpha$ -T | 177.01 (4.80) <sup>a</sup>  | 166.66 (11.26) <sup>a</sup> | 209.97 (3.43) <sup>a</sup>  | 177.22 (6.56) <sup>a</sup> |
| $\gamma$ -T | 726.50 (2.13) <sup>a</sup>  | 644.04 (1.97) <sup>a</sup>  | 749.95 (3.07) <sup>a</sup>  | 651.95 (7.60) <sup>a</sup> |
| $\delta$ -T | 126.95 (2.99) <sup>a</sup>  | 84.54 (0.56) <sup>b</sup>   | 97.31 (1.57) <sup>b</sup>   | 98.80 (8.52) <sup>b</sup>  |
| Total       | 1030.47 (2.69) <sup>a</sup> | 875.24 (3.46) <sup>a</sup>  | 1057.24 (2.71) <sup>a</sup> | 927.98 (2.71) <sup>a</sup> |

Letras diferentes en la misma fila indican diferencia significativa ( $P < 0.05$ ). Los valores representan la media del duplicado (coeficiente de variación).  
Iso= isomerizado

En presencia de oxígeno disuelto y luz UV, los tocoferoles forman el radical tocoferoxi y el anión superóxido, la escisión O-H y el enlace éter da lugar a la formación de radicales oxi (Sabliov et al., 2009). La disociación del radical oxi conduce a la formación de radicales tocoferil semiquinona, que a su vez reacciona con oxígeno disuelto para formar tocoferil quinona. Aunque el mecanismo de degradación de los tocoferoles mezclados en aceite de soya bajo luz UV no se entiende claramente, creemos que la sustitución de los grupos R1 y R2 en el anillo cromanal de tocoferol con grupo metileno o hidrógeno conduce a una degradación más rápida como es el caso con un  $\alpha$ -, y  $\delta$ -tocoferoles. Yettella et al. (2011) estudiaron el efecto de los  $\alpha$ -,  $\gamma$ - y  $\delta$ -tocoferoles en los rendimientos de CLA de aceite de soya y encontraron que los  $\gamma$ -tocoferol produjeron significativamente más CLA que otros tocoferoles. Los resultados de este estudio confirman que los  $\gamma$ -tocoferoles produjeron más CLA debido a su estabilidad bajo luz UV. Según lo informado por Yettella et al. (2011) durante la radiación el  $\gamma$ -tocoferol estable dona hidrógeno al radical de ácido linoleico para formar el radical  $\gamma$ -tocoferol. Entonces, el radical  $\gamma$ -tocoferol reacciona con yoduro de hidrógeno que se forma debido a la

reacción entre hidrógeno y el catalizador (yodo), para adquirir hidrógeno y volver a su estado original. Por lo tanto, debido a una mayor estabilidad,  $\gamma$ -tocoferoles fueron capaces de estabilizar el radical ácido linoleico y generar el radical yodo para ayudar en las reacciones.



**Figura 16. Pérdida de tocoferoles en el aceite de soya sometido a fotoisomerización y a un ciclo de freído.**

Los resultados son el promedio de tres determinaciones  $\pm$  desviación estándar. Letras minúsculas diferentes entre columnas del mismo color y mayúsculas entre columnas del mismo tratamiento indican diferencia estadística significativa ( $p < 0.05$ ).

El aceite testigo y los aceites isomerizados presentaron las características distintivas de un aceite de soya en la distribución de los tocoferoles ya que se encuentra en mayor cantidad el  $\gamma$ -tocoferol, el cual es deseable preservar debido a su actividad antioxidante intrínseca, que es más fuerte que  $\alpha$ -tocoferol (Medina-

Juárez, 2000). Se ha demostrado que  $\gamma$ -tocoferol puede prevenir la polimerización en aceites durante la fritura.

En la Figura 16 se observa el aceite testigo y los isomerizados antes y después de un ciclo de freído, donde el aceite isomerizado después de ser utilizado en el freído tiene una pérdida mayor al 50% esto es debido al impacto de los procesos a los cuales se sometió dicho aceite para llevar a cabo la isomerización, tales procesos son: exposición a la luz UV durante 144 h y la remoción de yodo (implica la adición de carbón activado y celite) y durante el freído en el cual se utiliza una temperatura 170 °C, estos son factores importantes para la pérdida de tocoferoles ya que estos son sensibles a la luz, calor y metales además del proceso de remoción de yodo. En este proceso se destruyen y adsorben una gran cantidad de compuestos que se encuentran como impurezas en el aceite. Sin embargo, al mismo tiempo son eliminados compuestos bioactivos como los carotenos, clorofila, metales traza y tocoferoles entre otros.

Los aceites isomerizados con la utilización de antioxidantes disminuyó la pérdida ya que no se encontró diferencia significativa después de un ciclo de freído. Se presentaron los mismos resultados al utilizar el antioxidante natural y el sintético.

#### **4.8 Efecto de la fotoisomerización sobre la estabilidad de los fitoesteroles**

Los fitoesteroles, también llamados esteroides vegetales, están ampliamente distribuidos en el reino vegetal, y el  $\beta$ -sitosterol, el campesterol y el estigmasterol se encuentran en altas concentraciones en semillas tales como maíz, soya, sésamo, colza y sus aceites (Trigueros et al., 2013).

Durante los últimos años, los fitoesteroides han recibido una atención especial debido a su supuesta capacidad de reducir la absorción de colesterol en los seres humanos, lo que reduce los niveles de colesterol sérico y, potencialmente, reduce el riesgo de enfermedades cardiovasculares (Alberici et al., 2016).

**Tabla 6. Contenido de fitoesteroles (mg/L) en el aceite de soya.**

| <b>Aceite</b> | <b>Soya</b>                 | <b>Soya iso</b>             | <b>Soya iso – catequina</b> | <b>Soya iso - TBHQ</b>     |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Ergosterol    | 1409.32(32.32) <sup>a</sup> | 1717.82(17.08) <sup>a</sup> | 1713.20(14.11) <sup>a</sup> | 1352.12(4.41) <sup>a</sup> |
| Campesterol   | 1209.48(11.63) <sup>a</sup> | 1060.27(11.03) <sup>a</sup> | 1065.22(5.86) <sup>a</sup>  | 1049.99(9.45) <sup>a</sup> |
| Estigmasterol | 744.03(10.26) <sup>a</sup>  | 776.16(15.58) <sup>a</sup>  | 700.00(8.17) <sup>a</sup>   | 700.29(8.59) <sup>a</sup>  |
| β- Sitosterol | 1470.90(6.14) <sup>a</sup>  | 1280.52(0.79) <sup>ab</sup> | 1128.16(1.07) <sup>b</sup>  | 1164.90(3.52) <sup>b</sup> |
| Total         | 4833.75(6.80) <sup>a</sup>  | 4834.79(6.20) <sup>a</sup>  | 4606.59(5.09) <sup>a</sup>  | 4267.32(0.47) <sup>a</sup> |

Letras diferentes en la misma fila indican diferencia significativa ( $P < 0.05$ ). Los valores representan la media del duplicado (coeficiente de variación).

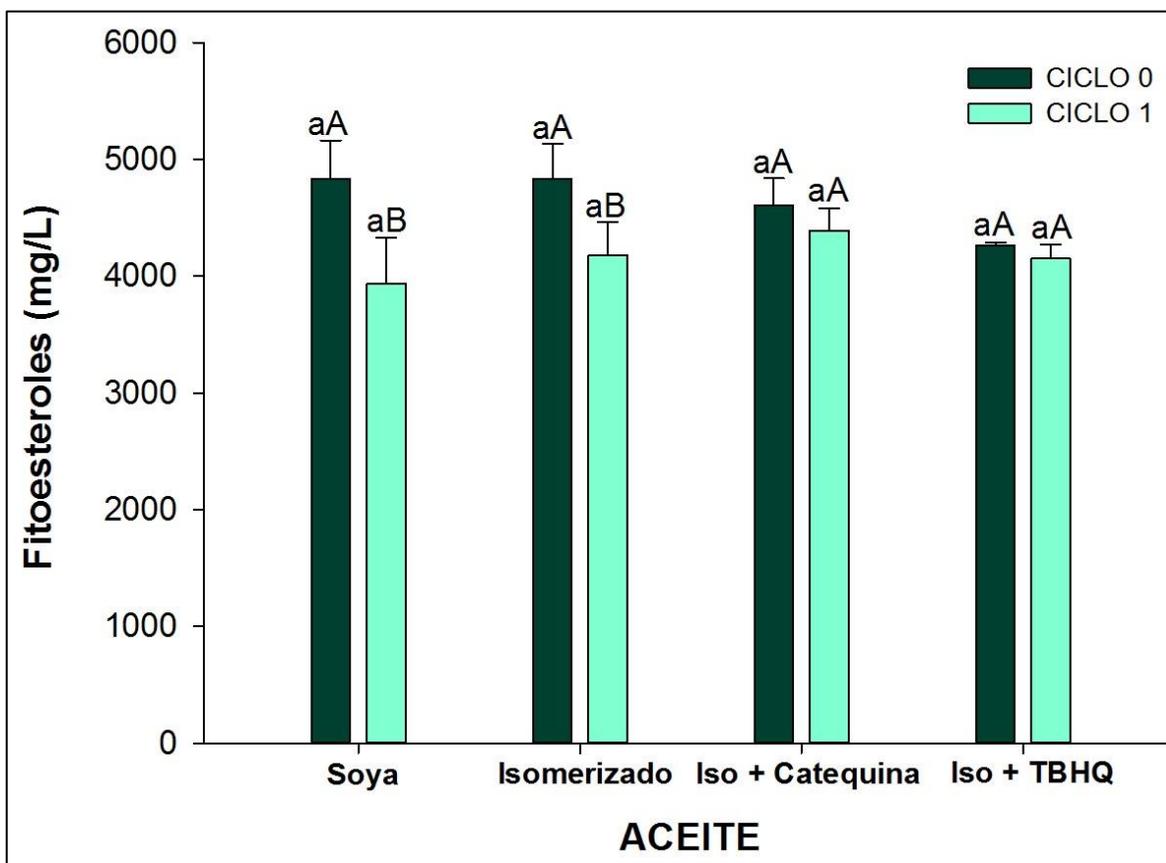
Iso= isomerizado

Con respecto a la cuantificación de los fitoesteroles, para el aceite de soya antes de la isomerización se observó una mayor cantidad del β-sitosterol con 1470.90 mg/L, el esteroil vegetal más común. El campesterol con 1209.48 mg/L y el estigmasterol con 744.03 mg/L, los cuales coinciden con la literatura. El ergosterol (1409.32 mg/L) se encontró en una cantidad similar al β-sitosterol a pesar de que en otros artículos no se considere como un fitoesterol abundante para el aceite de soya.

De acuerdo a lo publicado por Alberici et al. (2016) donde reporta un total de 1840 a 4120 mg/kg de fitoesteroles, en esta investigación se identificó otro fitoesterol (ergosterol) teniendo un total de 4833.75 mg/L de fitoesteroles en el aceite de soya.

En la Tabla 6 se observa que el proceso de fotoisomerización no afectó la cantidad de fitoesteroles ya que no se encuentra diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre cada uno de los fitoesteroles y su contenido total.

Después del proceso de freído los fitoesteroles fueron afectados significativamente en el aceite testigo y el isomerizado como se observa en la Figura 17, mientras que el aceite isomerizado con antioxidantes tanto natural como sintético no sufrió cambios en el contenido de estos, debido a la función que están cumpliendo los antioxidantes, resaltando que no hay diferencia entre el uso de la catequina y el TBHQ.



**Figura 17. Pérdida de fitoesteroides en el aceite de soja sometido a fotoisomerización y a un ciclo de freído.**

Los resultados son el promedio de tres determinaciones  $\pm$  desviación estándar. Letras minúsculas diferentes entre columnas del mismo color y mayúsculas entre columnas del mismo tratamiento indican diferencia estadística significativa ( $p < 0.05$ ).

## **V. CONCLUSIONES**

- Se logró obtener aceite de soya con un contenido de CLA del 22.05%, sin embargo las chips no mostraron diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) en el contenido de CLA.
- En los ciclos de freído el aceite fotoisomerizado fue estable presentando resultados inferiores a los límites máximos permitidos para el índice de peróxidos, *p*-anisidina y ácidos grasos libres, debido a que en el proceso de remoción de yodo se eliminaron productos de oxidación y ácidos grasos libres.
- La adición de antioxidantes mejoró la actividad oxidativa del aceite.
- El antioxidante sintético permitió una mayor estabilidad oxidativa en comparación con el antioxidante natural sobre los productos de oxidación secundaria.
- Un ciclo de freído no afectó significativamente ( $p < 0.05$ ) el contenido de CLA en el aceite.
- Se obtuvieron chips con un contenido de 7.33% de CLA y al consumir 40.9 g de chips puede cubrirse el requerimiento de ingestión mínimo por día (3 g de CLA/día).
- Los resultados de las determinaciones de color y textura de las chips mostraron comportamientos similares a las chips testigo, por lo tanto el uso de aceite isomerizado con y sin antioxidantes no es un factor que afecte las características de las chips. Un ciclo de freído no afectó el contenido de CLA en el aceite.
- El proceso de fotoisomerización no afectó el contenido de tocoferoles y fitoesteroles.

- El contenido de fitoesteroles y tocoferoles después de un ciclo de freído no disminuyó significativamente ( $p < 0.05$ ) debido al uso de antioxidantes.
- El contenido de  $\delta$ -tocoferol disminuyó en el aceite isomerizado.

## **VI. REFERENCIAS**

Agueda, M., Zulet, M. Á., & Martínez, J. A. (2009). Efecto del ácido linoleico conjugado (CLA) sobre el perfil lipídico en humanos. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 59(3), 245.

Aguilera, J. M., & Gloria-Hernandez, H. (2000). Oil absorption during frying of frozen parfried potatoes. *Journal of Food Science*, 65(3), 476-479.

Alberici, R. M., Fernandes, G. D., Porcari, A. M., Eberlin, M. N., Barrera-Arellano, D., & Fernández, F. M. (2016). Rapid fingerprinting of sterols and related compounds in vegetable and animal oils and phytosterol enriched-margarines by transmission mode direct analysis in real time mass spectrometry. *Food chemistry*, 211, 661-668

Anzaldúa A.M. (1994) La Evaluación Sensorial de los Alimentos en la Teoría y la Práctica. Zaragoza, Editorial Acribia S.A.

Badui D. S. (2006). Química de los alimentos. Edit. Pearson. Cuarta edición. 4, .245–297.

Bisig, W., Eberhard, P., Collomb, M., & Rehberger, B. (2007). Influence of processing on the fatty acid composition and the content of conjugated linoleic acid in organic and conventional dairy products-a review. *Le Lait*, 87(1), 1-19.

Botelho, A. P., Santos-Zago, L. F., & de Oliveira, A. C. (2008). Conjugated linoleic acid supplementation modified the body composition and serum leptin levels in weaning rats. *Archivos latinoamericanos de nutricion*, 58(2), 156.

Bramley, P. M., Elmadfa, I., Kafatos, A., Kelly, F. J., Manios, Y., Roxborough, H. E., Schuch, W., Sheehy, P. J. A. y Wagner, K. H. (2000). Vitamin E-a review). *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 80, 913-938.

Chen, Q., Zhao, J., Chaitep, S., & Guo, Z. (2009). Simultaneous analysis of main catechins contents in green tea (*Camellia sinensis* (L.)) by Fourier transform near infrared reflectance (FT-NIR) spectroscopy. *Food Chemistry*, 113(4), 1272-1277.

Coveca, C. A. (2002). Comisión veracruzana de comercialización agropecuaria. *Gobierno del Estado de Veracruz, México [in Spanish]*.

Dana, D., Blumenthal, M. M., & Saguy, I. S. (2003). The protective role of water injection on oil quality in deep fat frying conditions. *European Food Research and Technology*, 217(2), 104-109.

Diaz, A., Totté, A., Giroux, F., Reynes, M., & Raoult-Wack, A. L. (1996). Deep-fat Frying of Plantain (*Musa paradisiaca*L.). I. Characterization of Control Parameters. *LWT-Food Science and Technology*, 29(5-6), 489-497.

Dobarganes, C., Márquez-Ruiz, G., & Velasco, J. (2000). Interactions between fat and food during deep-frying. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 102(8-9), 521-528.

Emaga, T. H., Andrianaivo, R. H., Wathelet, B., Tchango, J. T., & Paquot, M. (2007). Effects of the stage of maturation and varieties on the chemical composition of banana and plantain peels. *Food chemistry*, 103(2), 590-600.

Emaga, T. H., Robert, C., Ronkart, S. N., Wathelet, B., & Paquot, M. (2008). Dietary fibre components and pectin chemical features of peels during ripening in banana and plantain varieties. *Bioresource Technology*, 99(10), 4346-4354.

FAOSTAT. Database from Food and Agriculture Organization 2012.

Fennema O. R. (1996). Química de los alimentos. Edit. Illustrated. Segunda edición. Cap. 5, pp.270 – 376.

Fernández Fraguas, C. (2009). *Caracterización reológica y optimización de la textura de purés de patata frescos y congelados: efectos del proceso y adición de crioprotectores* (Doctoral dissertation, Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones).

Fritsche, J., Rickert, R., Steinhart, H., Yurawecz, M. P., Mossoba, M. M., Sehat, N., & Ku, Y. (1999). Conjugated linoleic acid (CLA) isomers: formation, analysis, amounts in foods, and dietary intake. *Lipid/Fett*, 101(8), 272-276.

Gagliostro, G. A. (2004). Control nutricional del contenido de ácido linoleico conjugado (CLA) en leche y su presencia en alimentos naturales funcionales. 2. Producción de leche alto CLA a través de la suplementación estratégica de la vaca lechera. *Rev. Arg. Prod. Anim*, 24(3-4).

Gammill, W., Proctor, A., & Jain, V. (2010). Comparative study of high-linoleic acid vegetable oils for the production of conjugated linoleic acid. *Journal of agricultural and food chemistry*, 58(5), 2952-2957.

Gangidi, R. R., & Proctor, A. (2004). Photochemical production of conjugated linoleic acid from soybean oil. *Lipids*, 39(6), 577-582.

Ghosh, P. K., Chatterjee, D., & Bhattacharjee, P. (2012). Alternative methods of frying and antioxidant stability in soybean oil. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 4, 26-33.

Gnädig, S., Xue, Y., Berdeaux, O. Chardigny, J.M. y Sebedio, J.L. (2003). Functional dairy products. Mattlia-Sandholm T., Saarla M., Woodhead Publishing, Cambridge England. 263-289.

Higdon, J. V., & Frei, B. (2003). Tea catechins and polyphenols: health effects, metabolism, and antioxidant functions.

Jain, V. P., & Proctor, A. (2006). Photocatalytic production and processing of conjugated linoleic acid-rich soy oil. *Journal of agricultural and food chemistry*, 54(15), 5590-5596.

Jain, V. P., Proctor, A., & Lall, R. (2008). Pilot-scale production of conjugated linoleic acid-rich soy oil by photoirradiation. *Journal of food science*, 73(4), E183-E192.

Kabeya, M. J., Kabeya, U. C., Bekele, B. D., & Ingelbrecht, I. L. (2012). Genetic Analysis of Selected Cassava (*Manihot esculenta*) Genetic Pool in Africa Assessed with Simple Sequence Repeats. *World J. Agric. Sci*, 8, 637-641.

Krokida, M. K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z. B., & Marinos-Kouris, D. (2001). Effect of osmotic dedhydration pretreatment on quality of french fries. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 339-345.

León crespo, F. y Galán Soldevilla, H. Avances en Análisis Sensorial y paneles de cata. En: Modernas Tecnologías en el procesado de alimentos. Córdoba, Ed. Caja Provincial de Ahorros de Córdoba y ACTA-A, 1991.

Linaldi-Romero, E. (2015). Evaluación del grado de oxidación de aceite de soya enriquecido con ácido linoleico conjugado y de chips modelo de plátano macho. Tesis. Instituto Tecnológico de Tuxtepec.

López-Aguilar, J. R., Valerio-Alfaro, G., Monroy-Rivera, J. A., Medina-Juárez, L. A., O'mahony, M., & Angulo, O. (2006). Evaluation of a simple and sensitive sensory method for measuring rancidity in soybean oils. *Grasas y aceites*, 57(2), 149-154.

Ip, C., Chin, S. F., Scimeca, J. A., & Pariza, M. W. (1991). Mammary cancer prevention by conjugated dienoic derivative of linoleic acid. *Cancer Research*, 51(22), 6118-6124.

Ip, C., Singh, M., Thompson, H. J., & Scimeca, J. A. (1994). Conjugated linoleic acid suppresses mammary carcinogenesis and proliferative activity of the mammary gland in the rat. *Cancer research*, 54(5), 1212-1215.

Małecka, M. (2002). Antioxidant properties of the unsaponifiable matter isolated from tomato seeds, oat grains and wheat germ oil. *Food Chemistry*, 79(3), 327-330.

Marx, S. P., NÖSBERGER, J., & Frehner, M. (1997). Seasonal variation of fructan- $\beta$ -fructosidase (FEH) activity and characterization of a  $\beta$ -(2-1)-linkage specific FEH from tubers of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus*). *New Phytologist*, 135(2), 267-277.

Medina-Juárez, L. A., Gámez-Meza, N., Ortega-García, J., Noriega-Rodríguez, J. A., & Angulo-Guerrero, O. (2000). Trans fatty acid composition and tocopherol content in vegetable oils produced in Mexico. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 77(7), 721-724.

Moreno, M. C., & Bouchon, P. (2008). A different perspective to study the effect of freeze, air, and osmotic drying on oil absorption during potato frying. *Journal of food science*, 73(3), E122-E128.

Moyano, P. C., & Berna, A. Z. (2002). Modeling water loss during frying of potato strips: effect of solute impregnation. *Drying Technology*, 20(7), 1303-1318.

Navarro, L.A.A., López, J.F.J., López, D.J.J., López, R.J. Hernández, B.R., Ramírez, J.A.R., Colorado, A.R.M. y Alvarado, R.H. (2008). Estudio para determinar zonas de alta potencialidad del cultivo de plátano macho (*Musa paradisiaca*) en el estado de Tabasco.

Ouchon, p., aguilera, j. M., & pyle, d. L. (2003). Structure oil-absorption relationships during deep-fat frying. *Journal of food science*, 68(9), 2711-2716.

Pariza, M. W., Park, Y., & Cook, M. E. (2001). The biologically active isomers of conjugated linoleic acid. *Progress in lipid research*, 40(4), 283-298.

Park, Y., McGuire, M. K., Behr, R., McGuire, M. A., Evans, M. A., & Shultz, T. D. (1999). High-fat dairy product consumption increases  $\Delta 9c'11t-18:2$  (rumenic acid) and total lipid concentrations of human milk. *Lipids*, 34(6), 543-549.

Plasencia, f. W. P. (2009). Determinación de la calidad y predicción de propiedades físicas en chips de papa frita mediante visión computacional.

Pedreschi, F., Hernández, P., Figueroa, C., & Moyano, P. (2005). Modeling water loss during frying of potato slices. *International journal of food properties*, 8(2), 289-299.

Pedreschi, F., & Moyano, P. (2005). Effect of pre-drying on texture and oil uptake of potato chips. *LWT-Food Science and Technology*, 38(6), 599-604.

Pedreschi, F., & Moyano, P. (2005). Oil uptake and texture development in fried potato slices. *Journal of Food Engineering*, 70(4), 557-563.

Saguy, I. S., & Pinthus, E. J. (1995). Oil uptake during deep-fat frying: factors and mechanism. *Food technology (USA)*.

Rioseco, V. (1999). Transferencia de materia y parámetros de calidad durante la fritura de papas pretratadas con una solución de NaCl.

Ritzenthaler, K. L., McGuire, M. K., Falen, R., Shultz, T. D., Dasgupta, N., & McGuire, M. A. (2001). Estimation of conjugated linoleic acid intake by written dietary assessment methodologies underestimates actual intake evaluated by food duplicate methodology. *The Journal of nutrition*, 131(5), 1548-1554.

Robards, K., Prenzler, P. D., Tucker, G., Swatsitang, P., & Glover, W. (1999). Phenolic compounds and their role in oxidative processes in fruits. *Food chemistry*, 66(4), 401-436.

Sabliov, C. M., Fronczek, C., Astete, C. E., Khachatryan, M., Khachatryan, L., & Leonardi, C. (2009). Effects of temperature and UV light on degradation of  $\alpha$ -tocopherol in free and dissolved form. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 86(9), 895-902.

Saguy, I. S., & Dana, D. (2003). Integrated approach to deep fat frying: engineering, nutrition, health and consumer aspects. *Journal of food engineering*, 56(2), 143-152.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera -Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación. 2012, 2013, 2014, 2015. México. (SIAP-SAGARPA). [www.siap.gob.mx/](http://www.siap.gob.mx/).

Sigurgisladottir, S., Hafsteinsson, H., Jonsson, A., Lie, Ø., Nortvedt, R., Thomassen, M., & Torrissen, O. (1999). Textural properties of raw salmon fillets as related to sampling method. *Journal of Food Science*, 64(1), 99-104.

Sosa, M. E. and Velez, J. F. (2009). Effect of frying and combined treatments on fried foods. Food Processing and Eng. Topics. Capítulo 8 Nova Sci. Publishers, Inc. Nueva York.

Serpen, A., & Gökmen, V. (2009). Evaluation of the Maillard reaction in potato crisps by acrylamide, antioxidant capacity and color. *Journal of Food Composition and Analysis*, 22(6), 589-595.

Trigueros, L., Peña, S., Ugidos, A. V., Sayas-Barberá, E., Pérez-Álvarez, J. A., & Sendra, E. (2013). Food ingredients as anti-obesity agents: a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 53(9), 929-942.

Troncoso, E., & Pedreschi, F. (2009). Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. *LWT-Food Science and technology*, 42(6), 1164-1173.

Varela, G., & Ruiz-Rosso, B. (1998). Influence of the frying process on the real fat intake. *Grasas y aceites*, 49(3-4), 366-369.

Ventura, E. G. 2010. "Efecto del pre-tratamiento enzimático en la calidad física del plátano macho (*Musa paradisiaca* var. AAB) empleando secado con flujo de aire revertido". Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Tuxtepec.

Vitrac, O., Dufour, D., Trystram, G., & Raoult-Wack, A. L. (2001). Deep-fat frying of cassava: influence of raw material properties on chip quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81(2), 227-236.

Yang, T. S., & Liu, T. T. (2004). Optimization of production of conjugated linoleic acid from soybean oil. *Journal of agricultural and food chemistry*, 52(16), 5079-5084.

Yettella RR, Henbest B, Proctor A (2011) Effects of antioxidants on soy oil CLA production and its oxidative stability. *J Agric Food Chem* 59(13):7377–7384

Yettella, R. R., Castrodale, C., & Proctor, A. (2012). Oxidative stability of conjugated linoleic acid rich soy oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 89(4), 685-693.

Yettella, R. R., Henbest, B., & Proctor, A. (2013). Effect of UV Processing Treatments on Soy Oil Conjugated Linoleic Acid Yields and Tocopherols Stability. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 90(6), 863-870.

Yu, L. (2001). Free radical scavenging properties of conjugated linoleic acids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(7), 3452-3456.

Zlatanov, S., Laskaridis, K., Feist, C., & Sagredos, A. (2002). CLA content and fatty acid composition of Greek Feta and hard cheeses. *Food Chemistry*, 78(4), 471-477.