

**ACRILAMIDA EN ALIMENTOS SOMETIDOS A TRATAMIENTOS TÉRMICOS**

**Paula Ximena Fernández Franco**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS  
SANTIAGO DE CALI, 2015**

# **ACRILAMIDA EN ALIMENTOS SOMETIDOS A TRATAMIENTOS TÉRMICOS**

Autora:

**Paula Ximena Fernández Franco**

**Propuesta de trabajo de grado, en modalidad de monografía como requisito parcial  
para optar al Título de Ingeniero de Alimentos**

Directora:

**PROF. LUCIA STELLA CABRERA ZAMBRANO**

Co-Directora:

**PROF. CLAUDIA ISABEL OCHOA MARTINEZ**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS  
SANTIAGO DE CALI, 2015**

## **DEDICATORIA**

*Este trabajo es dedicado primero a Dios y a mis padres por su acompañamiento incondicional durante toda mi vida y en especial en esta etapa, a mi prima Lizeth Sierra quien siempre estuvo brindándome su apoyo incondicional y a mi novio Julian Alejandro Osorio a quien tuve la fortuna de conocer a lo largo de la construcción de este proyecto.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mis agradecimientos a todas las personas que me apoyaron en la realización de éste proyecto, especialmente a mis padres Luz Dary Franco y Jaime Fernández por su apoyo incondicional, a mi hermano quien me apoyo y me colaboro con las instalaciones para llevar a cabo este trabajo, a mi prima Lizeth Sierra quien siempre estuvo pendiente de cada uno de los altibajos que se presentaron durante la realización de este trabajo, a mi novio Julian Alejandro Osorio por su inmenso amor y apoyo al final de esta etapa además por escucharme y aconsejarme cuando más lo he necesitado. También agradezco a las profesoras de la Escuela de Ingeniería de Alimentos Lucia Stella Cabrera y Claudia Isabel Ochoa por su valiosa asesoría y acompañamiento.

## CONTENIDO

Lista de Tablas.....	6
Lista de Figuras .....	6
RESUMEN .....	7
1 INTRODUCCIÓN.....	7
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
3 JUSTIFICACION.....	9
4 OBJETIVOS.....	9
4.1 GENERAL .....	9
4.2 ESPECÍFICOS .....	9
5 ACRILAMIDA EN ALIMENTOS .....	9
5.1 ANTECEDENTES.....	10
5.2 FORMACIÓN DE ACRILAMIDA EN ALIMENTOS.....	11
5.2.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FORMACIÓN DE ACRILAMIDA .....	14
5.2.2 DETERMINACIÓN DE ACRILAMIDA.....	20
5.2.3 ESTABILIDAD DE LA ACRILAMIDA .....	21
5.2.4 REGULACIÓN ACRILAMIDA .....	24
5.2.5 NIVELES DE ACRILAMIDA EN ALIMENTOS .....	26
5.2.5.1 TUBÉRCULOS.....	26
5.2.5.2 CEREALES.....	29
5.2.5.3 CAFÉ .....	33
6 RELACIÓN DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN LA FORMACIÓN DE ACRILAMIDA.....	36
6.1 COCCIÓN .....	37
6.1.1 HORNEADO .....	37
6.1.2 FRITURA .....	38
7 ALTERNATIVAS PARA LA REDUCCIÓN DE ACRILAMIDA .....	40
7.1 REDUCCIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE PRECURSORES.....	40
7.2 CONDICIONES DE PROCESAMIENTO .....	41
7.3 PRE TRATAMIENTOS.....	43
7.4 ADICIÓN O SUSTITUCIÓN DE INGREDIENTES .....	45
8 CONCLUSIONES.....	49
9 BIBLIOGRAFIA .....	50

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Contenido promedio de acrilamida ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) en productos alimenticios .....	22
Tabla 2. Recomendaciones de la Caja de Herramientas.....	25
Tabla 3. Niveles de acrilamida en productos alimenticios .....	26
Tabla 4. Contenido de acrilamida en papas fritas y aperitivos de la Comunidad Valenciana .....	27
Tabla 5. Contenido de Acrilamida ( $\mu\text{g} / \text{kg}$ ) en 20 variedades de papa almacenadas a $8^{\circ}\text{C}$	28
Tabla 6. Contenido de acrilamida en hojuelas de cereal .....	30
Tabla 7. Contenido de asparagina en variedades de trigo de Europa .....	31
Tabla 8. Variación de los niveles de acrilamida en galletas comerciales.....	32
Tabla 9. Concentración de acrilamida ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )* en galletas en relación con la temperatura y el contenido de humedad final.....	33
Tabla 10. Niveles de acrilamida de diferentes productos alimenticios ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) .....	39
Tabla 11. Extracción de precursores de acrilamida en papas .....	44
Tabla 12. Efecto de la adición de ácidos orgánicos en el contenido de acrilamida.....	46

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de la acrilamida.....	11
Figura 2. Rutas de formación de acrilamida.....	13
Figura 3. Formación de acrilamida en mezclas de asparagina-glucosa (barras negras) y asparagina-fructosa (barras blancas) en función de la humedad ( $180^{\circ}\text{C}$ , 5 min) [Blank <i>et al.</i> , 2005].....	15
Figura 4. Formación de acrilamida en mezcla aspargina-glucosa (barras negras) y asparagina-fructosa (barras blancas) en función del pH ( $180^{\circ}\text{C}$ , 5 min, $20\mu\text{L}$ ) [Blank <i>et al.</i> , 2005]	16
Figura 5. Efecto del pH sobre el contenido de acrilamida.....	17
Figura 6. Formación de acrilamida en un sistema asparagina-glucosa a 5 ( $\blacktriangle$ ) y 60 ( $\bullet$ ) minutos .....	17
Figura 7. Formación de acrilamida en papas horneadas a $200^{\circ}\text{C}$ .....	18
Figura 8. Formación de acrilamida en papas horneadas a $232^{\circ}\text{C}$ .....	18
Figura 9. Formación de acrilamida en el freído de papas.....	19
Figura 10. Efecto de la humedad sobre la reducción de acrilamida en el pan.....	23
Figura 11. Efecto del almacenamiento de pan sobre el contenido de acrilamida.....	24
Figura 12. Imagen térmica de una sección transversal de una hojuela de cereal [Taeymans <i>et al.</i> , 2004].....	29
Figura 13. Formación de acrilamida en el tostado del café [Taeymans <i>et al.</i> , 2004].....	34
Figura 14. Mecanismos de transferencia de calor [Pérez y Sosa, 2013] .....	36
Figura 15. Efecto de las soluciones de bambú en los niveles de acrilamida en papas fritas	45
Figura 16. Efecto de los aminoácidos sobre el contenido de acrilamida en un sistema glucosa-asparagina ( $150^{\circ}\text{C}$ , 20 minutos) .....	47
Figura 17. Efecto de la glicina sobre la acrilamida en panes blandos .....	48
Figura 18. Efecto de la lisina y la glicina sobre el contenido de acrilamida en papas fritas	48

## RESUMEN

Aunque la mayoría de personas consumen a diario alimentos procesados teniendo en cuenta sus cualidades nutricionales, en algunos casos este tipo de alimentos tiene en su composición sustancias no deseadas, tal es el caso de la acrilamida que se forma en alimentos que se someten a temperaturas elevadas.

Con el hallazgo de la acrilamida en alimentos se realizó una consulta por entidades como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) donde se reconoció a la acrilamida como un riesgo potencial, posteriormente se realizó una reunión del Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios (JECFA) con el fin de evaluar los riesgos para la salud de este contaminante.

La acrilamida se considera un agente tóxico y se forma en los alimentos durante la reacción de Maillard. Este compuesto se encuentra clasificado como un pro-cancerígeno en humanos y puede generar daños en el sistema nervioso [Adegoke *et al.*, 2002].

El desarrollo de esta revisión permitió recopilar información sobre la formación, métodos de detección, estabilidad, regulación y niveles de acrilamida en alimentos que se someten a tratamientos térmicos como la cocción y las alternativas para mitigar su formación o reducirla a través de pre tratamientos, condiciones y variables de proceso.

**Palabras clave:** Acrilamida, alimentos procesados, temperatura, tratamientos térmicos.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los alimentos se procesan con el fin de satisfacer las necesidades de los consumidores en aspectos como salubridad, palatabilidad, características organolépticas, vida útil y digestibilidad [Gil y Ruiz, 2010]. Este procesamiento puede ser empleando tratamientos térmicos, los cuales tienen efectos sobre el valor nutritivo, lo que involucra aspectos de nutrición, ciencia de los alimentos y salud. Por lo tanto es necesario tener una comprensión de los mecanismos que ocurren durante el procesamiento de alimentos y de sus consecuencias nutricionales, con el fin de garantizar la calidad nutricional y funcional de los alimentos y minimizar la formación de compuestos no deseados.

En el año 2002 se descubrió la presencia de acrilamida en alimentos, una sustancia química tóxica y pro-cancerígena que se produce en alimentos que han sido sometidos a elevadas temperaturas ya sea al cocerlos, asarlos o freírlos [Adegoke *et al.*, 2002]. Aunque es probable que esta sustancia siempre haya hecho parte de la dieta diaria de los humanos al cocinar los alimentos, se ha generado una preocupación por la seguridad alimentaria, por lo que se han empezado a realizar análisis para caracterizar y disminuir su presencia en los alimentos. La

acrilamida se ha detectado en una amplia variedad de alimentos, que han sido preparados tanto de manera industrial como de forma casera [Adegoke *et al.*, 2002].

La formación de acrilamida es un fenómeno de superficie, que ocurre principalmente en la corteza del alimento donde se alcanzan con mayor rapidez temperaturas elevadas. Su formación depende del tipo de alimento, el contenido en agua, la temperatura y el tiempo de cocción. La FAO/OMS la clasificó como pro-cancerígeno en humanos, clase 2A. Se ha demostrado que esta sustancia en bajas dosis produce cáncer en los animales. La ingesta máxima establecida por la FAO es de 0,004 mg/kg porción diaria en consumidores habituales [Valenzuela y Ronco, 2007].

Los investigadores en general coinciden que los alimentos con mayor contenido de acrilamida son los alimentos fritos u horneados, como los pasteles, las papas y el pan. El Comité Mixto de Expertos en Aditivos Alimentarios (JECFA) reportó que el alimento que más contribuye al consumo total de acrilamida en la mayoría de los países son las papas fritas (16-30%), las papas fritas de bolsa (chips) (6-46%), el café (13-39%), y los productos de pastelería y las galletas dulces (10-20%) [Lucas, 2003].

La exposición a la acrilamida genera daño al sistema nervioso en seres humanos y animales [LoPachin y Lehning, 1994] y también hay datos que exponen más de un peligro para la salud en las personas expuestas ya que se considera una toxina antireproductiva, con características mutagénicas y carcinógenas [Dearfield *et al.*, 1988].

Todo esto impone nuevos retos para la industria de alimentos, y con este trabajo se pretende investigar a fondo sobre la formación de acrilamida en los alimentos que se someten a tratamientos térmicos y tras una revisión de investigaciones en el área, poder integrar distintos puntos de vista y exponer una opinión de lo que se dispone actualmente, además de plantear los controles que se pueden llevar a cabo a los procesos industriales en variables como la temperatura y el tiempo para reducir el contenido de acrilamida en alimentos.

## **2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Posteriormente al estudio realizado por suecos en el año 2002, el antiguo Comité científico sobre la alimentación humana (SCF, por las siglas en inglés) publicó la opinión sobre la amenaza en la salud que representa la presencia de acrilamida en alimentos, por lo que se han generado múltiples investigaciones en todo el mundo sobre distintos aspectos como la formación, degradación, métodos de reducción, determinación de acrilamida y resultados experimentales en procesos térmicos, pero todos estos estudios se encuentran dispersos y aunque existen también diversas revisiones no existe un documento que recopile la mayoría de investigaciones realizadas en el mundo o relacione los distintos aspectos nombrados. Por lo tanto, desde el enfoque de la ingeniería de alimentos, es importante una compilación y análisis de los estudios que se han realizado a nivel mundial sobre la formación de acrilamida en alimentos y su afectación en la seguridad alimentaria que permitan confrontar resultados obtenidos de dichas investigaciones.



### **3 JUSTIFICACION**

El ser humano emplea el calor para cocinar los alimentos que además de brindar sabores, aromas y un aspecto deseado también genera compuestos no recomendables, y desde hace varios años se descubrió una de las sustancias que ha despertado gran interés a nivel mundial llamada acrilamida, la cual es un contaminante que en dosis elevadas puede generar complicaciones como daño en el tejido nervioso.

La acrilamida se forma en alimentos que son sometidos a procesos de calentamiento y fue descubierta inicialmente en la papas fritas caseras, empaquetadas y cereales, aunque actualmente no se han realizado estudios genotóxicos y carcinogénicos en humanos como efecto de esta sustancia, se han desarrollado estudios y métodos para reducir su producción, por lo tanto el desafío actualmente está en mejorar los métodos de detección, disminuir los contenidos formados y establecer el riesgo real que se puede provocar en la salud de los consumidores a nivel mundial.

### **4 OBJETIVOS**

#### **4.1 GENERAL**

Realizar una revisión bibliográfica sobre acrilamida en alimentos que han sido sometidos a tratamientos térmicos y obtener una compilación de diversos estudios.

#### **4.2 ESPECÍFICOS**

- Recopilar y ordenar los datos e investigaciones sobre acrilamida en alimentos que son sometidos a tratamientos térmicos.
- Presentar alternativas de solución encontradas por los investigadores para disminuir el contenido de acrilamida en los alimentos sometidos a tratamientos térmicos.

### **5 ACRILAMIDA EN ALIMENTOS**

Tratamientos térmicos como la cocción, fritura, horneado, asado, y tostado, entre otros, se emplean para obtener sabores y texturas únicas en los alimentos procesados, resultando más atractivos y de mayor palatabilidad. Mediante estos procesos ocurren reacciones que son de gran importancia para la producción de aroma, sabor y color; en algunos casos estas modificaciones son deseables como ocurre con el pan, los cereales, y el chocolate entre otros [Richardson, 2004]. Durante los procesos térmicos ocurren una multitud de cambios físicos, químicos y nutricionales del alimento, los cuales dependen de factores como la humedad, el tipo de alimento, la temperatura del proceso y el tiempo de residencia [Parkash Kochhara y Gertz, 2004].

De la variedad de alimentos analizados hasta la fecha, los niveles de acrilamida son más elevados en las papas fritas y en los productos a base de cereales que han sido sometidos a

procesos con calor [Adegoke *et al.*, 2002]. Se ha determinado que la principal vía de síntesis de acrilamida es la reacción de Maillard entre aminoácidos y azúcares reductores, siendo la asparagina (precursor), el principal aminoácido libre presente en papas (*Solanum tuberosum*) y cereales, y un participante crucial en la producción de acrilamida por esta vía [Mottram *et al.*, 2002].

## 5.1 ANTECEDENTES

En el año 2002 la Autoridad Sanitaria Sueca de los Alimentos (Swedish National Food Authority) junto a un grupo de investigadores de la Universidad de Estocolmo descubrieron la formación de acrilamida en los alimentos [OMS y FAO, 2005]. Desde entonces se ha encontrado esta sustancia en una amplia variedad de alimentos procesados a temperaturas elevadas. La acrilamida puede formarse en algunos alimentos durante el proceso de fritura, tostado o asado, cuando se alcanzan temperaturas de 120°C o más. Inicialmente se descubrió que las papas fritas caseras y empaquetadas, las galletas dulces y saladas, el pan tostado, los cereales de desayuno, las papas asadas, ciertos productos de confitería y el café la contenían [Fernández, 2008].

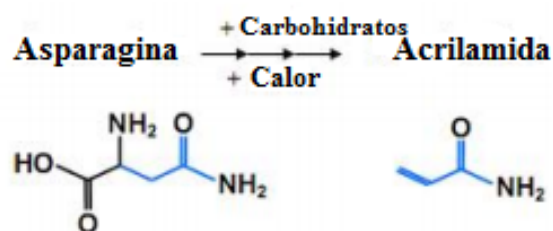
Desde los estudios publicados en el año 2002, la industria de alimentos empezó a trabajar en conjunto con grupos de investigación, autoridades y entidades, para encontrar más claridad en la formación de la acrilamida en alimentos, además de buscar métodos para evitar o reducir su formación.

En el año 2003, empezó el proyecto HEATOX (Toxinas alimenticias generadas por calor: Identificación, caracterización y minimización de riesgos) el cual fue iniciado por investigadores de 14 países, la mayoría de ellos europeos con el fin de examinar la toxicidad de los alimentos inducida al someterlos a tratamientos térmicos con principal énfasis en la acrilamida y que permitió conocer y comprender más acerca de la formación de acrilamida [Spivey, 2010]. El equipo a través de pruebas toxicológicas descubrió que la acrilamida en los alimentos podría causar cáncer y también ha revelado que existen formas de disminuir la exposición a la acrilamida, pero no su eliminación. Además se detectó que la presencia de acrilamida en los alimentos cocinados en el hogar es mínima en comparación con los alimentos expuestos a procesos industriales o preparados en restaurantes. Por lo tanto la participación en el proyecto HEATOX de numerosos científicos procedentes de diferentes disciplinas ha permitido que se elaboren cálculos relativos a la ingesta, modelos de reacción química, evaluaciones relativas a la exposición, ensayos de toxicidad in vivo e in vitro, propuestas de mitigación para reducir la ingesta, métodos analíticos para los biomarcadores y niveles y la caracterización del riesgo [Chavarrías, 2007].

Entre los resultados de este proyecto se destaca una publicación de la Guía contra la acrilamida por parte de la Asociación Europea de la Industria y Comercio de Alimentos y Bebidas (Food Drink Europe, FDE), con el objetivo de proporcionar herramientas prácticas a los productores para que puedan reducir la acrilamida de acuerdo con su proceso industrial. Esta guía es un concepto dinámico y permanece en continua actualización [Castillo, 2014].

## 5.2 FORMACIÓN DE ACRILAMIDA EN ALIMENTOS

La acrilamida es un compuesto orgánico de tipo amida que tiene un amplio uso en la industria por ser un intermediario químico en la producción y la síntesis de poliacrilamidas, también se usa como aditivo en cosméticos, acondicionador de suelos, procesamiento de minerales y en la formulación de agentes selladores. Se presenta como un polvo blanco cristalino soluble en agua, etanol, metanol, dimetiléter y acetona [Valenzuela y Ronco, 2007]. Su estructura química se puede ver en la Figura 1 que se presenta a continuación:



**Figura 1. Estructura de la acrilamida**

La acrilamida se puede formar por diversos mecanismos:

- Reacción del carbonilo (azúcar reductor) con la asparagina.
- De la interacción de ácido acrílico con amoníaco.
- A partir de la descarboxilación de la asparagina al calentarse o por la reacción de Strecker.
- A través de ácido acrílico o acroleína junto con asparagina que puede provenir de la degradación de lípidos (ruta marginal).
- Mediante la deshidratación / descarboxilación de ciertos ácidos orgánicos comunes incluyendo ácido málico, ácido láctico y ácido cítrico.

Sin embargo la acrilamida se forma principalmente en los alimentos por la reacción de la asparagina (un aminoácido) con azúcares reductores (particularmente glucosa y fructosa) como parte de la reacción de Maillard, el aminoácido reacciona con el grupo carbonilo de los azúcares reductores durante el calentamiento donde se forma una base Schiff, la cual posteriormente se descarboxila, dando paso a intermedios de la reacción de Maillard llamados iminas, los cuales pueden liberar acrilamida directa o indirectamente por la acción de su precursor 3-aminopropionamida. Por lo tanto la acrilamida en realidad no es un producto final de la reacción de Maillard, sino un producto intermedio que puede estar sujeto a una reacción de degradación [Moreno *et al.*, 2007]. La formación de acrilamida se produce principalmente en condiciones de altas temperaturas (generalmente superiores a 120 °C) y escasa humedad [Masson *et al.*, 2007]. Otra vía de formación implica la formación inicial de ácido acrílico, a partir de diferentes aminoácidos como β-alanina, carnosina y ácido aspártico, o a través de la serina y la cisteína que generan ácido pirúvico, el cual se puede transformar posteriormente en ácido acrílico, que al interactuar con amoníaco produce acrilamida. Pero

la eficiencia de convertir el ácido acrílico en acrilamida está limitada a la disponibilidad de amoníaco libre el cual es muy volátil a temperaturas elevadas [Yaylayan *et al.*, 2005].

La reacción de Maillard o pardeamiento no enzimático es la reacción de aminoácidos, péptidos y proteínas con los azúcares reductores [Richardson, 2004]. Se han atribuido a esta reacción diversas modificaciones como cambio de color, producción de compuestos aromáticos y de sabor, producción de compuestos bioactivos tanto beneficiosos como tóxicos, pérdida de la calidad nutritiva y cambios de textura. El color es una característica asociada a la reacción y una cualidad ante la cual el consumidor responde por lo tanto es una propiedad importante, además se ha supuesto de acuerdo a la intensidad del color pardo cierta magnitud y avance de la reacción química [Fayle y Gerrard, 2005]. Sin dicha reacción no se obtendría el color tostado de la corteza del pan y las galletas, entre otros. Sin embargo esta reacción será perjudicial si en la apariencia del producto no se desea dicha coloración.

Estudios genotóxicos y carcinogénicos realizados en animales roedores han demostrado que la administración prolongada de acrilamida daña el material genético de las células e induce tumores y que las vías para el metabolismo de la acrilamida son similares en estos animales con los humanos. Por lo tanto considerando toda la información disponible, la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC) ha catalogado a la acrilamida como “probable carcinogénico para los humanos” (clase 2<sup>a</sup>) [Valenzuela y Ronco, 2007].

De acuerdo a la información disponible sobre la formación de acrilamida en algunos alimentos los niveles pueden aumentar de acuerdo a la duración del calentamiento. Se forma además en alimentos de origen vegetal que poseen alto contenido de carbohidratos. Stadler *et al.* [2002] determinaron que el calentamiento de asparagina y glucosa a 180 °C por 30 minutos producen 368 µmol de acrilamida por mol de asparagina.

La superficie de los alimentos es la que presenta mayor cantidad de acrilamida ya que es donde se alcanza con mayor rapidez las altas temperaturas. Los niveles de acrilamida se incrementan con el tiempo, pero esto depende principalmente de la temperatura [Amrein *et al.*, 2005; Tareke *et al.*, 2002]. La investigación realizada por Ehling y Shibamoto [2005] muestra la relación entre la formación de acrilamida y el color caramelo de los alimentos el cual aumenta su intensidad de acuerdo a la temperatura y al tiempo de calentamiento, al igual que la correlación existente con la formación de pirazinas en las etapas iniciales de la reacción de Maillard.

En la Figura 2 se presentan algunas de las rutas de formación de acrilamida según Taeymans *et al.* [2004], que plantearon la formación inicial de N-(D-glucos-1-il)-L asparagina (I) a partir de glucosa y asparagina, la cual está en equilibrio con la base de Schiff (II) (paso A). Usualmente y de preferencia, cuando esta reacción se produce en medio acuoso, procede por la vía (D) y produce 1-amino-1-deoxicetosa de asparagina, conocido como el compuesto de Amadori (VII), el cual representa el primer producto intermedio estable generado en un sistema acuoso como resultado temprano de la reacción de Maillard. La base de Schiff puede experimentar una ciclación intramolecular (paso B) resultando la oxazolidina-5-1-derivado (III), cuando este último compuesto se descarboxila, se obtiene el compuesto de Amadori (IV), la descarboxilación del compuesto de Amadori se descompone a través de β-

eliminación (paso C) resultando finalmente una molécula de acrilamida (V) y un amino azúcar (VI). Una vía alternativa a considerar [Mottram *et al.*, 2002] es la reacción de Strecker de asparagina (paso G) en presencia de dicarbonilos (VIII), generados a partir del compuesto de Amadori VII (paso F), conduciendo al aldehído de Strecker (IX). La reducción de (IX) a su correspondiente alcohol (X) y su subsiguiente deshidratación (paso J) puede producir acrilamida.

La vía de la formación de acrilamida en un sistema de glucosa – asparagina puede llegar a ocurrir antes de la formación del compuesto de Amadori (etapa D) y la cantidad de acrilamida encontrada a partir de N-glucosil asparagina (I) es 10 veces mayor que la formada a partir del compuesto de Amadori (VII). Parece que tan pronto como se forma el compuesto, este comienza a degradarse a través de las rutas de reacción de Maillard que conducen a 1 y 3 deoxyosones que favorecen la formación de compuestos de sabor y color, en lugar de acrilamida.

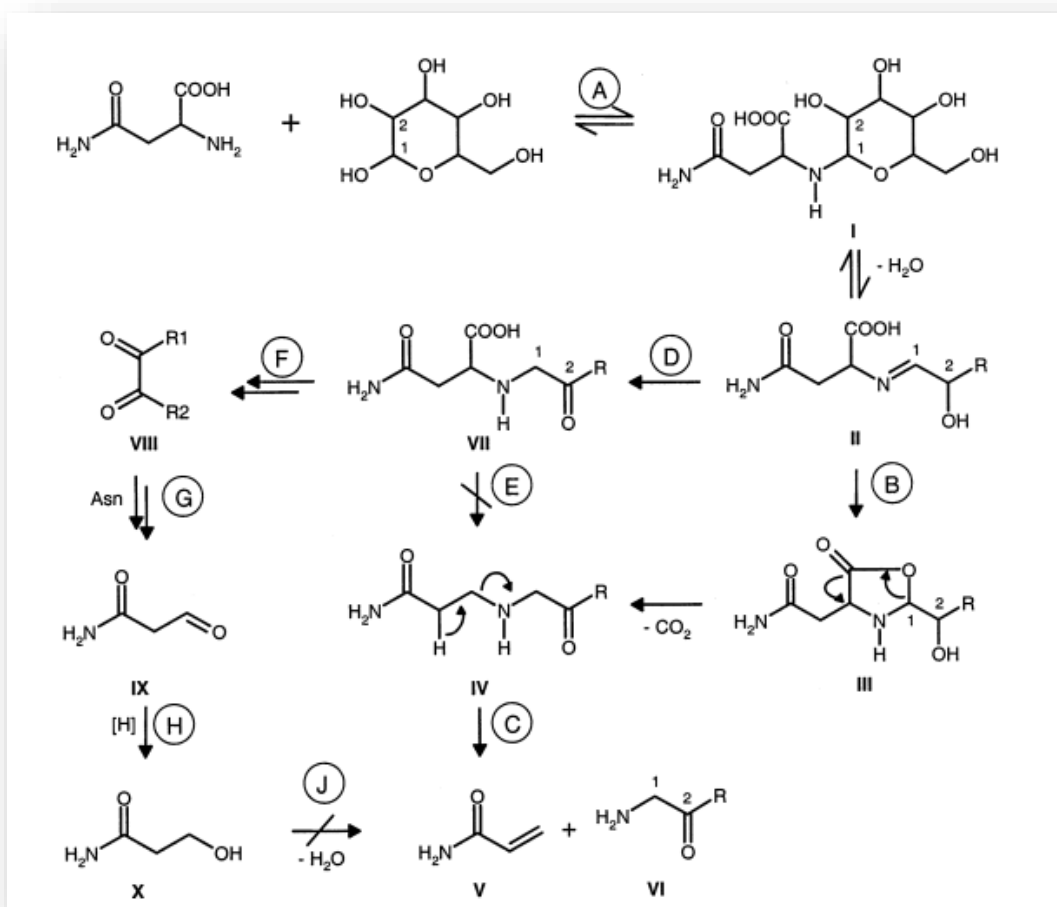


Figura 2. Rutas de formación de acrilamida

Ehling y Shibamoto [2005] realizaron una investigación en un sistema modelo de pardeamiento el cual fue calentado a 170°C durante 30 minutos, para identificar la relación entre la formación de acrilamida, el color y las pirazinas. Entre los resultados obtenidos se encontró que el nivel más elevado de acrilamida se produjo cuando la relación asparagina / glucosa fue 1:3 en el sistema de pruebas en diferentes alimentos de consumo humano. De acuerdo a investigaciones realizadas por Tareke *et al.* [2002] se encontraron niveles moderados de acrilamida (5-50 µg/kg) en alimentos ricos en proteínas sometidos al calor y contenidos más elevados (150-4000 µg/kg) en alimentos ricos en carbohidratos como las papas y sus derivados comerciales, la remolacha y el pan. Teniendo en cuenta las investigaciones mencionadas se observa que uno de los precursores presente en los alimentos y que genera niveles altos de acrilamida en alimentos que se someten a tratamientos térmicos son los azúcares reductores.

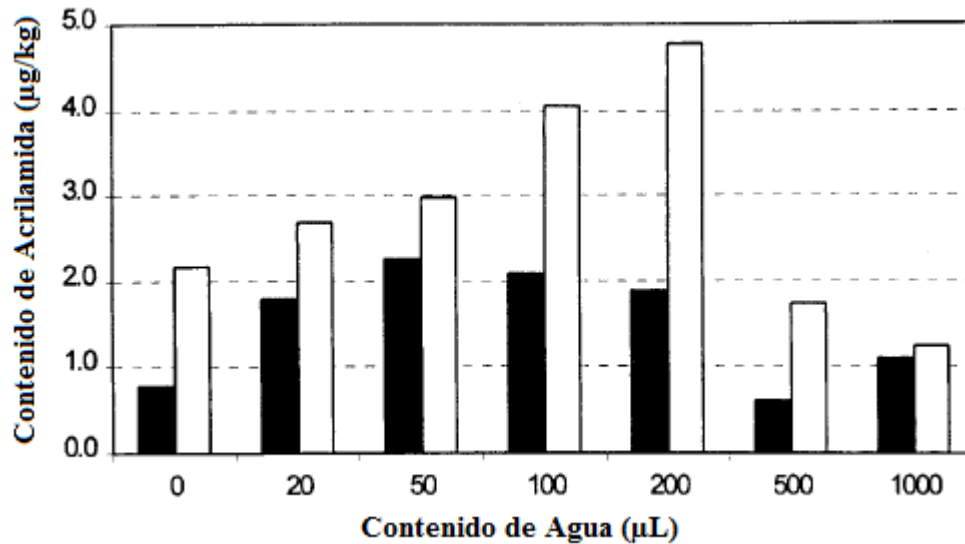
Cuando se descompone térmicamente la asparagina se obtiene que el principal producto presente es la maleimida, debido a la reacción de ciclación intramolecular rápida que previene la formación de acrilamida. Por lo tanto la asparagina al no estar junto al azúcar reductor se somete a ciclación intramolecular y forma una imida en lugar de descarboxilarse y formar acrilamida [Yaylayan *et al.*, 2003].

Aunque en procesos térmicos las reacciones de descarboxilación y la desaminación de asparagina por sí sola puede producir acrilamida, la presencia de azúcares es necesaria para efectuar la conversión de la asparagina en acrilamida. Investigaciones han indicado que la descarboxilación del compuesto de Amadori a partir de la asparagina con azúcares reductores es el precursor clave de acrilamida, el cual es formado a través de la ciclación intramolecular de la base de Schiff. Por lo tanto una descarboxilación de baja energía en este intermedio hace posible pasar por alto la reacción de ciclación, que está en competencia con la descarboxilación inducida térmicamente, y por lo tanto promover la formación de acrilamida en mezclas de carbohidratos – asparagina. Aunque el compuesto de Amadori se puede formar bajo otras condiciones en medio acuoso, requiere temperaturas muy elevadas para romper el enlace covalente carbono-nitrógeno y producir acrilamida [Yaylayan *et al.*, 2003].

### 5.2.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FORMACIÓN DE ACRILAMIDA

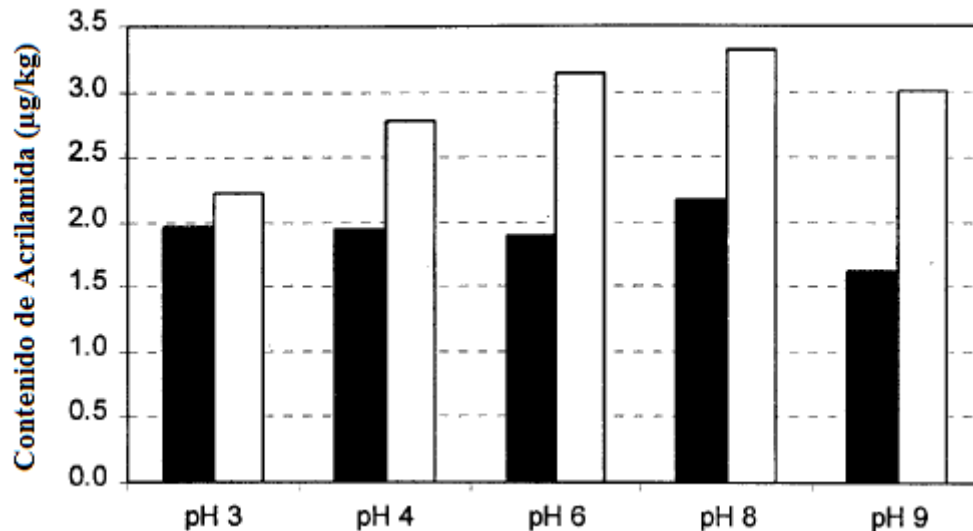
- **Tipo de azúcar:** Han surgido investigaciones sobre el efecto que tiene el tipo de azúcar en la formación y rendimiento de acrilamida. Se ha comprobado que la fructosa genera mayor cantidad frente a la glucosa, en condiciones de baja humedad y a una temperatura menor. Estudios muestran que la mayor reactividad de la fructosa se debe a su bajo punto de fusión (126 °C), haciendo que la reacción sea más rápida con la amina para formar la base de Schiff [Yaylayan y Stadler, 2005].
- **Humedad:** Otra condición que debe tenerse en cuenta y que favorece la formación de acrilamida es la baja humedad, ya que el contenido de agua puede intervenir en la reacción química y el estado del sistema que incluye la temperatura de la reacción y la transferencia de calor [Blank *et al.*, 2005]. En la Figura 3 se muestra el efecto del

contenido de agua en la formación de acrilamida, en el caso del sistema asparagina – fructosa, la acrilamida se incrementa a mayor contenido de agua hasta llegar a 50  $\mu\text{L}$ , a partir de allí descende. En el caso del sistema asparagina – glucosa muestra un aumento hasta 200  $\mu\text{L}$ .



**Figura 3. Formación de acrilamida en mezclas de asparagina-glucosa (barras negras) y asparagina-fructosa (barras blancas) en función de la humedad (180°C, 5 min) [Blank *et al.*, 2005]**

- Potencial de hidrógeno:** El pH ha sido estudiado como medio para controlar los niveles de acrilamida en productos alimenticios, debido a que la reacción inicial amino-carbonilo se ve obstruida debido a la protonación del grupo amino a pH bajo. De acuerdo a estudios realizados por Blank *et al.* [2005] existe una influencia débil del pH en la formación de acrilamida, sin embargo, en un sistema con fructosa se observaron niveles menores de acrilamida a un pH de 3 (2,2 mmol / mol), frente a un pH 8, que representó condiciones óptimas de reacción y se formó mayor cantidad de acrilamida (3,3 mmol / mol) como se puede observar en la Figura 4. También en experimentos realizados por Rydberg *et al.* [2003] se encontró que el pH donde hubo mayor formación de acrilamida fue alrededor de 8 y que a menor pH se mejoró la eliminación y se desaceleró la formación.



**Figura 4. Formación de acrilamida en mezcla aspargina-glucosa (barras negras) y asparagina-fructosa (barras blancas) en función del pH (180°C, 5 min, 20µL) [Blank *et al.*, 2005]**

Como se observa en la Figura 4, las muestras que contienen fructosa presentaron mayor nivel de acrilamida en comparación con las muestras de glucosa a diferentes valores de pH, incluso en muestras que presentaban baja humedad la fructosa generaba más acrilamida, a pesar de que la glucosa, como aldohexosa debe ser químicamente más reactiva, ya que el grupo aldehído no se hidrata [Blank *et al.*, 2005]. A pesar que la influencia del pH es leve en la formación de acrilamida, la reacción inicial del aminoácido con el carbonilo del azúcar reductor se ve obstaculizada por la protonación del grupo amino a un pH bajo.

En la Figura 5 se muestra el resultado de experimentos realizados por Rydberg *et al.* [2003] donde se observa la relación de pH en la formación de acrilamida en una muestra de papas calentadas en un horno durante 25 minutos a diferentes temperaturas. El pH de la muestra original era de 5,72 y su acidificación se realizó con HCl. Se establece claramente que a pH bajos la formación de acrilamida es menor a medida que aumenta la temperatura del tratamiento térmico al que se someta el alimento.



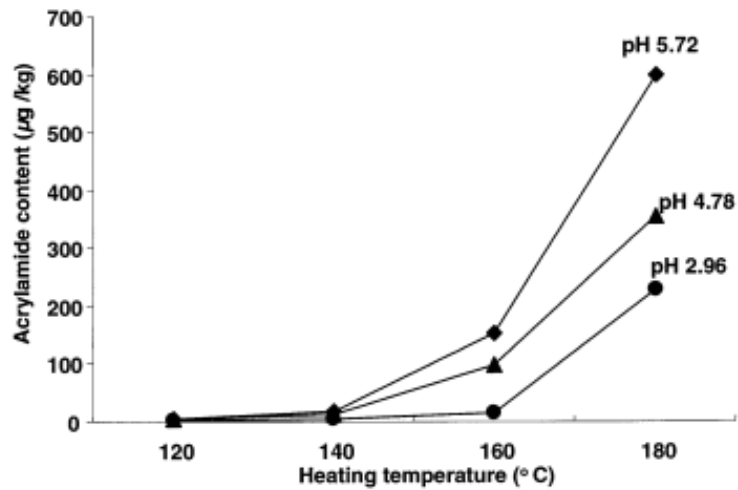


Figura 5. Efecto del pH sobre el contenido de acrilamida

- **Temperatura y tiempo del tratamiento térmico:** En otra serie de experimentos realizados por Blank *et al.* [2005], se investigó la relación de formación de acrilamida con la temperatura, como se muestra en la Figura 6.

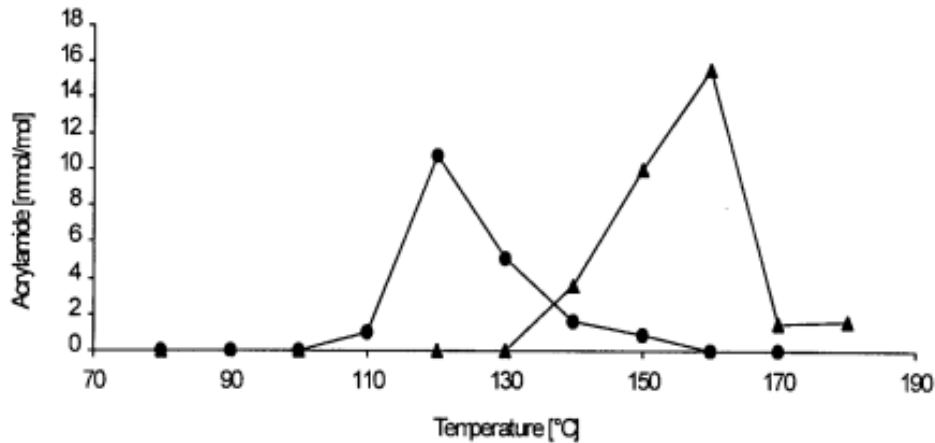
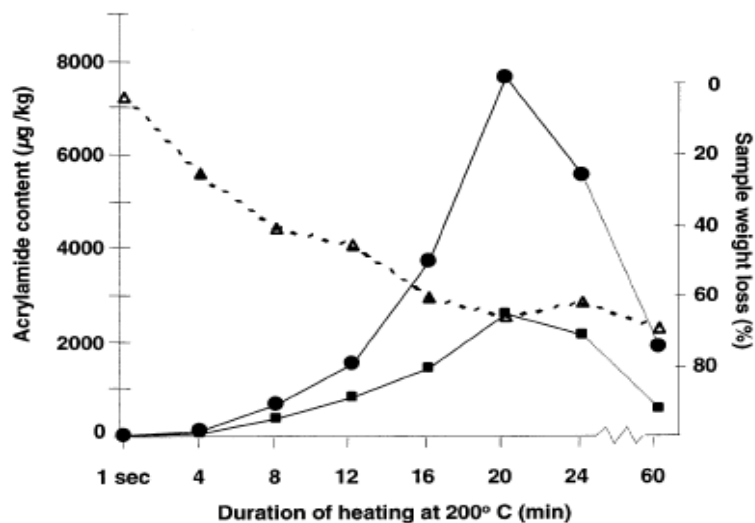


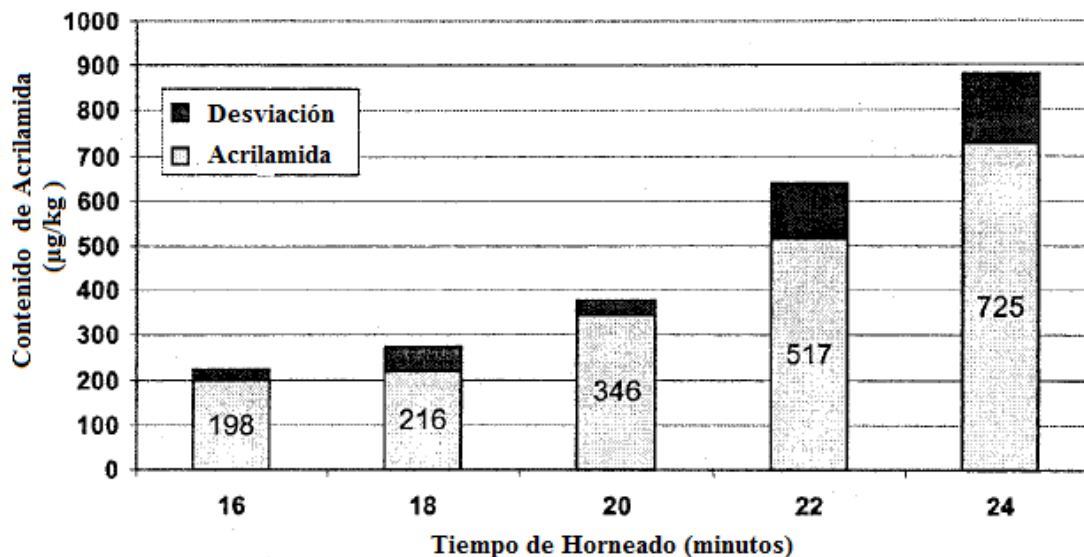
Figura 6. Formación de acrilamida en un sistema asparagina-glucosa a 5 (▲) y 60 (●) minutos

La interacción del tiempo y la temperatura afectan fuertemente la formación de acrilamida. La pirólisis de la glucosa y la asparagina a diferentes temperaturas presentó un comportamiento variable, además se observa que para formar niveles elevados de acrilamida a 120°C se requiere de tiempos de exposición largos (curva de 60 minutos ●), mientras que a 160 °C se requiere de mucho menos tiempo (curva de 5 minutos ▲). Estos dos parámetros se relacionan y por tanto representan un medio para controlar la formación en el procesamiento de alimentos. El declive que se observa en las curvas se presenta por la descomposición de acrilamida debido a la polimerización [Stadler *et al.*, 2004]. Este mismo

comportamiento también es observado en estudios realizados por Rydberg *et al.* [2003], Jackson y Al-Taher [2005] en papas horneadas como se presenta en la Figura 7 y 8.



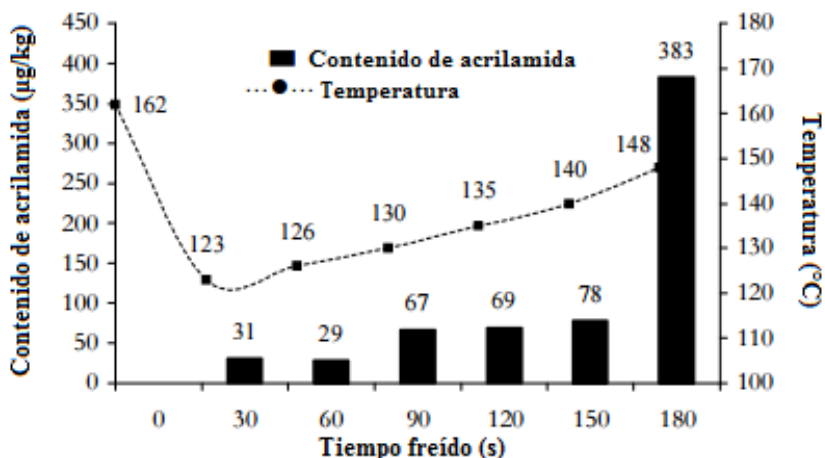
**Figura 7. Formación de acrilamida en papas horneadas a 200°C**  
**(■) Compensación por la pérdida de peso (indicado por la línea punteada) y (●) sin la corrección por la pérdida de peso por el tratamiento térmico**



**Figura 8. Formación de acrilamida en papas horneadas a 232°C**

La Figura 7 presenta una corrección en cuanto a pérdida de peso en el alimento (papas) que se ve afectado por el tratamiento térmico donde pierde aproximadamente 50-70% del peso original, razón por la cual se ve gran diferencia en el contenido de acrilamida entre la Figura 7 y 8, además la diferencia por 32°C de temperatura en el horneado también afecta los niveles de acrilamida cuando aumenta el tiempo.

Otra relación directa se presenta en el aumento del contenido de acrilamida respecto a la temperatura y tiempo de freído en papas como se observa en la siguiente gráfica [Dunovská *et al.*, 2004].



**Figura 9. Formación de acrilamida en el freído de papas**

En la figura 9 se ve claramente la influencia de la temperatura y el tiempo de freído en el contenido de acrilamida, cuando las papas son sometidas a una temperatura por encima de 160°C por 180 segundos el contenido de acrilamida es elevado 383 µg/kg, en cambio a bajas temperaturas y tiempos de freído cortos el nivel de acrilamida es bajo y no sobrepasa de 100 µg/kg.

- Tipo de aceite:** Debido a que las papas fritas son aquellas que presentan mayores niveles de acrilamida es importante considerar en su formación el tipo de aceite empleado para el freído, ya que al usar aceite de palma o manteca de cerdo se presentaron altos niveles de acrilamida en comparación con aceites vegetales como el de girasol, debido a la emulsificación de grandes cantidades de diacilglicerol presentes; además cuando se genera la hidrólisis del aceite existen modificaciones en la tensión superficial entre el agua que se encuentra en la superficie del alimento y el aceite lo cual altera la transferencia de calor [Gertz *et al.*, 2003]. Por otra parte estudios realizados por Becalski *et al.* [2003] evidenciaron en muestras de papas freídas con aceite de oliva mayor concentración de acrilamidas en comparación con el aceite de maíz, a pesar que el aceite de oliva es más rico en ácidos grasos monoinsaturados al ser sometido a elevadas temperaturas sufre un proceso de oxidación rápido. Uno de los métodos de formación en los cuales se involucran los aceites, ocurre a través de la hidrólisis o pirólisis de los triacilglicerol que conlleva a la formación de acroleína la cual puede oxidarse y formar ácido acrílico que al reaccionar con amoníaco genera acrilamida, sin embargo a partir de estudios realizados por Mestdagh *et al.* [2008] estos precursores que son producto de la degradación del aceite contribuyen muy poco en comparación con la cantidad de acrilamida que se genera a partir de la presencia de azúcares reductores.

- **Condiciones de la materia prima:** Al igual que el aceite se debe tener en cuenta la temperatura de almacenamiento de la materia prima (papas) ya que al someterla a temperaturas inferiores de 8-10°C se presenta un fenómeno conocido como “endulzamiento a baja temperatura” el cual consiste en el aumento de la concentración de azúcares reductores y se considera que ocurre como reacción de la papa para protegerse de la congelación, lo cual genera un mayor potencial de formación de acrilamida en las papas fritas [Amrein *et al.*, 2003; Dunovská *et al.*, 2004]. Amrein *et al.* [2003] y Jackson y Al-TaHER [2005] demostraron el aumento de azúcares reductores y el potencial de formación de acrilamida en papas almacenadas a 4°C durante 15 días casi 28 veces por encima de papas que no son almacenadas. Sin embargo, la asparagina no se modifica durante la conservación a bajas temperaturas antes del procesamiento industrial de las papas [Olsson *et al.*, 2004].
- **Superficie y volumen del alimento expuesto al tratamiento térmico:** Otro aspecto a considerar es la relación de superficie y volumen (SA:V) de la papa que se va a someter a freído; por ejemplo, en rodajas de papas que presentan baja relación superficie-volumen los niveles de acrilamida aumentaron con el incremento de tiempo y temperatura (la superficie de las rodajas de papas fritas nunca llegó 175°C incluso cuando la temperatura del aceite fue de 220°C), sin embargo en papas con mayor SA:V como papas ralladas (papas a la francesa) los mayores niveles se presentaron a 160-180°C y luego comenzaron a descender al aumentar la temperatura y el tiempo debido a la degradación de la acrilamida, [Taubert *et al.*, 2004]. En formas con baja SA:V, la transferencia de calor al centro del alimento es más lenta .

### 5.2.2 DETERMINACIÓN DE ACRILAMIDA

La presencia de acrilamida en alimentos térmicamente procesados ha generado la necesidad de métodos analíticos adecuados para la determinación, con el objetivo de mejorar los resultados analíticos y tener mejor comprensión de las capacidades de los métodos. Sin embargo la acrilamida no se puede detectar fácilmente ya que posee alta solubilidad y bajo peso molecular y es una molécula muy reactiva además que carece de un grupo cromóforo. Debido a que los alimentos transformados son complejos es necesario tener métodos de detección sensibles como la cromatografía líquida o cromatografía de gases combinada con espectrometría de masas (LC-MS o GC-MS). La ventaja de los métodos basados en LC-MS es que la acrilamida puede analizarse sin derivatización previa, facilitando y agilizando el análisis. Otro método existente es la reacción de transferencia de protones seguida de espectrometría de masas (PTR-MS) [Masson *et al.*, 2007].

- **Método basado en la cromatografía de gases – espectrometría de masas (GC-MS):** Los análisis de acrilamida que se realizan con este tipo de método se basan en la derivatización del analito (bromación) o análisis directo que puede llegar a sobreestimar los niveles de acrilamida, aunque la bromación es más compleja tiene grandes ventajas como una selectividad mejorada, aumento de la volatilidad, sensibilidad y estabilidad.

Además es apta para alimentos que requieran un nivel de detección en un rango de 5-10  $\mu\text{g}/\text{kg}$  aunque utilizando un espectrómetro de masas de alta resolución se reduciría este umbral de detección a un rango de 1-2  $\mu\text{g}/\text{kg}$  [Moreno *et al.*, 2007].

- **Método basado en la cromatografía líquida – espectrometría de masas (LC-MS):** Este método ha sido empleado por diferentes expertos a través de la extracción en fase sólida, una etapa de limpieza y posterior concentración. En este método se tiene un límite de detección de 20-50  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . Debido a la interferencia de compuestos en matrices alimenticias complejas se ha optado por extraer el analito en un disolvente orgánico polar como el acetato de etilo de donde se extrae la acrilamida de la fase acuosa. El nivel de detección en este caso está en un rango de 10-30  $\mu\text{g}/\text{kg}$  aproximadamente. La extracción a través de acetato de etilo también puede ser realizada después de la extracción en fase sólida mejorando la sensibilidad en matrices complejas [Taeymans *et al.*, 2004].
- **Reacción de transferencia de protones - espectrometría de masas (PTR-MS):** Es el método adecuado para mediciones rápidas, ya que combina un medio sensible y eficiente de ionización química, por lo tanto es útil para investigar procesos dinámicos rápidos, como la formación de aromas y contaminantes volátiles en reacciones de Maillard [Masson *et al.*, 2007].

En los métodos anteriormente mencionados se pueden presentar errores debido a una extracción incompleta, muestreo incorrecto o destrucción de la acrilamida durante este proceso. Aunque cada método presenta variabilidad y no han sido validados por entidades internacionales se debe tener en cuenta que la acrilamida es muy reactiva y volátil, además puede degradarse después de su formación por lo tanto su detección no es fácil.

Es necesario tener en cuenta las matrices de alimentos complejos que presentan niveles bajos de acrilamida y que no son detectables por ser valores inferiores a 10  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , al igual que deben ser métodos de detección rápidos y económicos para que sean empleados en entornos cercanos a donde se lleva a cabo la producción de los alimentos, lo que permite un control más eficiente y una respuesta más rápida.

### 5.2.3 ESTABILIDAD DE LA ACRILAMIDA

La estabilidad de la acrilamida a lo largo del tiempo es variable en función del alimento, los niveles permanecen estables en galletas, pan, cereales, papas fritas, y maní, pero en café y cacao en polvo se observa una disminución significativa (305 a 210  $\mu\text{g}/\text{kg}$  en café y 265 a 180  $\mu\text{g}/\text{kg}$  en cacao) después de 3-6 meses de almacenamiento debido a los componentes de los alimentos y / o a productos de reacciones que pueden afectar [Hoenicke y Gatermann, 2005].

**Tabla 1. Contenido promedio de acrilamida ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) en productos alimenticios**

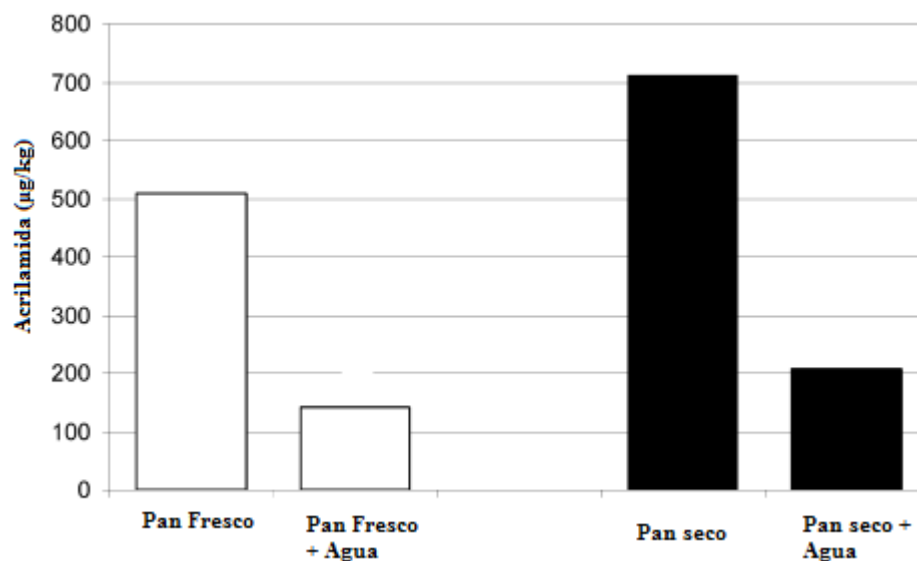
Alimento	Tiempo almacenamiento (meses)	Acrilamida antes del almacenamiento	Acrilamida después del almacenamiento
Galletas de mantequilla	3	140	150
Galletas de chocolate	3	250	275
Galletas wafers	3	130	130
Galletas integrales	3	170	180
Galletas de harina	3	45	50
Galletas dietéticas	3	530	470
Galletas dietéticas e integrales	3	2400	2000
Pan crujiente	3	760	770
Hojuelas integrales	3	250	260
Hojuelas de maíz	3	80	90
Papas fritas	3	500	540
Maní	3	50	60
Azúcar	3	130	120
Caramelo de regaliz	3	550	450
Café tostado y molido	3	305	210
Granos de café	3	285	200
Café en polvo	3	840	850
Sustitutos del café	12	1300	1200
Cacao en polvo	3	265	180

De acuerdo a la tabla presentada se observa que después de tres meses de almacenamiento pocos productos presentaron disminución en el contenido de acrilamida como las galletas dietéticas (disminución del 11%), las galletas dietéticas integrales (disminución del 17%), caramelo de regaliz (disminución del 18%), pero se observa que en productos como galletas de chocolate, galletas de harina, hojuelas, maní hubo un incremento y puede ser por la presencia de bicarbonato de amonio que acelera la producción de asparagina y fructosa a bajas temperaturas [Hoenicke y Gatermann, 2005]. En cuanto a los productos como los granos de café, el café tostado y el cacao en polvo presentan una disminución la cual puede ser atribuida a reacciones entre sus componentes. En el café en polvo y los sustitutos se encuentra una estabilidad después del almacenamiento ya que pueden estar menos disponibles los componentes que hacen factible la degradación de acrilamida.

- **Efecto de la temperatura en el almacenamiento:** En estudios realizados al pan crujiente el cual fue almacenado por 224 días a temperaturas entre  $-80$  y  $40^{\circ}\text{C}$ , las muestras sometidas a las más altas temperaturas presentaron disminución en el contenido de acrilamida, por ejemplo en muestras a  $20^{\circ}\text{C}$  disminuyó 22% y a  $40^{\circ}\text{C}$  disminuyó 29%, por el contrario en las temperaturas de almacenamiento inferiores  $-80$ ,  $-20$  y  $6^{\circ}\text{C}$  la variación fue mínima [Mustafa *et al.*, 2008a]. En comparación con estudios realizados

por Mustafa *et al.* [2008b] donde se reportó que la reducción de acrilamida en pan crujiente de centeno almacenado por 20 meses a  $-20^{\circ}\text{C}$  fue del 40%, se podría deducir que la mayor reducción ocurre en productos que se almacenan a temperatura bajas y que alcanzan un máximo de reducción entre 50 y 100 días de almacenamiento, debido a reacciones que se siguen presentando al interior del alimento o al aire caliente que rodea al pan cuando está recién horneado que puede contener una fracción de acrilamida (0,15-3,3%) [Eriksson, 2005].

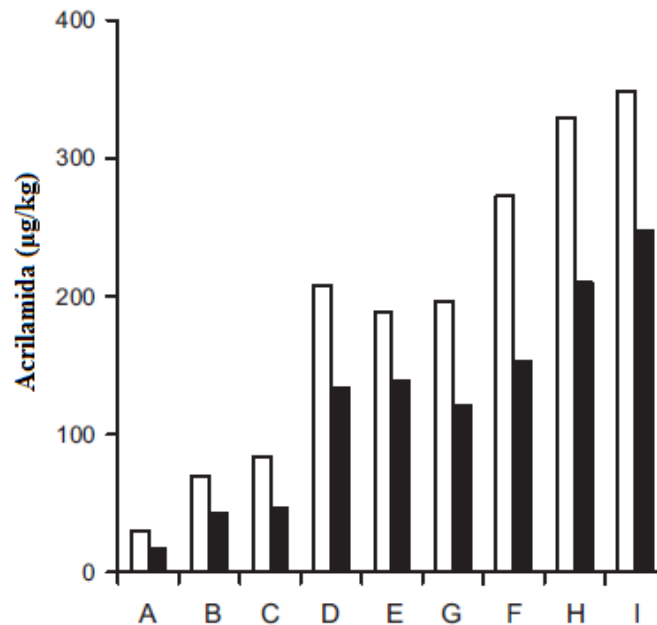
- **Efecto de los empaques en el almacenamiento:** De acuerdo a Mustafa *et al.* [2008a] estudios llevados a cabo en pan crujiente de centeno que se almacenó durante 70 días con empaque y otras muestras sin empaque se obtuvo una reducción de acrilamida de 37% en las muestras que fueron selladas y de 15% en aquellas que no lo estaban, además, esta reducción fue mayor durante los primeros días de almacenamiento por efecto de la humedad en el espacio cerrado.
- **Efecto de la humedad en el almacenamiento:** Para comprobar si el agua es la causante de la reducción de acrilamida durante el almacenamiento se llevaron a cabo estudios en pan crujiente a  $40^{\circ}\text{C}$  durante 70 días y se varió su contenido de humedad, y se obtuvo que aquellas muestras almacenadas con su contenido de humedad inicial presentaron menores niveles de acrilamida (6%) en comparación con aquellas que se almacenaron después de un secado al vacío [Mustafa *et al.*, 2008a]. Se puede concluir que el contenido de humedad en un alimento es importante para la reducción de acrilamida durante el almacenamiento, por lo tanto es un factor que debería ser más estudiado ya que puede ser un catalizador en la reacción de degradación. En la siguiente figura se muestran los resultados obtenidos del estudio realizado sobre el efecto de la humedad en el pan donde se encontró una disminución aproximada del 70% de acrilamida en muestras humedecidas previamente.



**Figura 10.** Efecto de la humedad sobre la reducción de acrilamida en el pan

En la Figura 10 se muestra la influencia de la humedad en el contenido de acrilamida en panes, al observar los panes que fueron humedecidos (pan + agua) se demuestra que el contenido de acrilamida es mucho más bajo en comparación con las muestras de pan sin inclusive si el pan es sometido a un secado prevalece esta relación.

Estudios llevados a cabo por Mustafa *et al.* [2008b] demuestran el mismo comportamiento respecto a muestras de pan almacenadas 20 meses las cuales presentaron una disminución en su contenido de acrilamida de aproximadamente 37% como se muestra en la Figura 11.



**Figura 11. Efecto del almacenamiento de pan sobre el contenido de acrilamida.**  
Pan fresco □ y pan almacenado 20 meses ■

Esta disminución es atribuida nuevamente a reacciones internas entre los componentes del alimento que contribuyen a la degradación de acrilamida.

#### 5.2.4 REGULACIÓN ACRILAMIDA

Los efectos carcinogénicos de acrilamida en humanos aún no han sido comprobados por lo tanto aún no se ha podido crear una regulación estricta sobre los niveles que se deben mantener en alimentos potenciales. Sin embargo, la Comisión Europea ha brindado unos valores indicativos y ha generado informes que están destinados a manifestar la necesidad de más investigaciones por parte de diferentes entes de control e industrias, ya que no se han establecido umbrales de seguridad de acrilamida en alimentos. Por lo tanto, tras la evaluación del riesgo de JECFA (Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios) y la gestión realizada por el Codex Alimentarius a nivel internacional se ha propuesto un Código de Prácticas para la reducción de acrilamida en los alimentos y una “Caja de Herramientas” elaborada por la industria de alimentos y bebidas de Europa (Food and Drink Europe - FDE),



las cuales realizan un Análisis de Peligros y Puntos de Control Crítico (APPCC) de cada proceso alimentario y establecen en qué medida las opciones que se conocen actualmente sirven para minimizar los niveles de acrilamida.

Algunos apartados de la Caja de Herramientas y del Código de Prácticas se han llevado a folletos informativos para ayudar a las industrias alimentarias a ponerlos en funcionamiento para orientarse, prevenir y reducir los contenidos de acrilamida en sus productos. Actualmente existen folletos para galletas y crackers, productos de panadería, cereales de desayuno, patatas fritas de bolsa y patatas fritas. En la Tabla 2 se presenta un resumen de estas recomendaciones [FAO y WHO, 2012].

**Tabla 2. Recomendaciones de la Caja de Herramientas**

<b>Producto</b>	<b>Recomendaciones</b>
<b>Papas fritas tradicionales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Emplear variedades de papa con bajo contenido de azúcares.</li> <li>-Almacenar las papas por encima de 6°C.</li> <li>-Corte grueso de las papas.</li> <li>-Realizar un escaldado.</li> <li>-Freír a temperatura máxima de 175°C, evitando cocer en exceso.</li> </ul>
<b>Papas fritas tipo Chips</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Emplear variedades de papa con bajo contenido de azúcares.</li> <li>-Almacenar las papas por encima de 6°C.</li> <li>-Usar ingredientes que compensen el color tradicional de las papas fritas.</li> <li>-Estandarizar y optimizar las condiciones de freído.</li> <li>-Realizar un escaldado para eliminar el exceso de azúcares.</li> <li>-Pelar adecuadamente.</li> </ul>
<b>Cereales de desayuno</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Cultivo de granos de cereal en suelos ricos en azufre.</li> <li>-Minimizar el uso de azúcares reductores.</li> <li>-Elegir cereales con menor contenido de asparagina.</li> <li>-No hornear y tostar en exceso.</li> <li>-Evitar coloración excesivamente oscura en los productos finales.</li> </ul>
<b>Productos de panadería</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Cultivo de granos de cereal en suelos ricos en azufre.</li> <li>-Reemplazar el bicarbonato de amonio por bicarbonato de sodio.</li> <li>-Adicionar sales de calcio.</li> <li>-Usar asparaginasa.</li> <li>-No hornear en exceso.</li> </ul>
<b>Galletería, repostería</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Cultivo de granos de cereal en suelos ricos en azufre.</li> <li>-Reemplazar el bicarbonato de amonio por bicarbonato de sodio.</li> <li>-Sustituir fructosa por glucosa.</li> <li>-No hornear en exceso.</li> <li>-Evitar coloración excesivamente oscura en los productos finales.</li> </ul>

### 5.2.5 NIVELES DE ACRILAMIDA EN ALIMENTOS

Hasta ahora hay una limitada cantidad de alimentos analizados, pero los niveles promedios más elevados de acrilamida se han encontrado en papas fritas y en productos a base de cereales, como se muestra en la Tabla 3, de acuerdo a estudios realizados en Noruega, Suecia, Suiza, Reino Unido y Estados Unidos.

**Tabla 3. Niveles de acrilamida en productos alimenticios**

Alimento/Grupo de Productos	Niveles de acrilamida ( $\mu\text{g} / \text{kg}$ )		
	Media	Mínimo-Máximo	Número de muestras
Papas fritas en rodajas finas	1312	170-2287	38
Papas fritas en rodajas gruesas	537	<50-3500	39
Productos rebozados	36	<30-42	2
Productos de panadería	112	<50-450	19
Galletas, tostadas, pan	423	<30-3200	58
Cereales para el desayuno	298	<30-1346	29
Copos de maíz	218	34-416	7
Pan blando	50	<30-162	41
Pescado, mariscos	35	30-39	4
Carnes blancas	52	39-64	2
Bebidas de malta	50	<50-70	3
Chocolate en polvo	75	<50-100	2
Café en polvo	200	170-230	3
Cerveza	<30	<30	1

Fuente: [Adegoke *et al.*, 2002]

Los niveles de acrilamida detectados en alimentos resultan más elevados en las papas fritas, cereales, galletas los cuales se someten a procesos con calor el horneado y freído, pero no es detectable en alimentos antes de ser tratados con calor o que son sometidos a escaldado (<5  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ). Por lo tanto si son sometidos a temperaturas relativamente bajas la presencia de esta sustancia es mínima [Tareke *et al.*, 2002].

#### 5.2.5.1 TUBÉRCULOS

Uno de los tubérculos comestibles ampliamente conocido es la papa o patata (*Solanum tuberosum*) la cual es una planta perteneciente a la familia de las solanáceas, esta puede ser hervida, frita u horneada para su consumo, sin embargo bajo las dos últimas técnicas

mencionadas anteriormente las papas pueden llegar a contener hasta 500 veces más acrilamida que productos derivados de cereales como arroz, palomitas, productos de panadería, bebidas de café entre otros. En el Reino Unido se realizaron pruebas para determinar las concentraciones de acrilamida en papas fritas normales y papas fritas cortadas en rebanadas finas. Se confirmó que las papas crudas no presentan acrilamida, mientras que el contenido en papas fritas varió entre 310 y 3500 µg/kg y en papas sometidas a fritura más prolongada se alcanzaron niveles de 12000 a 12800 µg/kg [García y Alfaro, 2007].

La cinética de formación de acrilamida y su degradación tienen que ver con la composición de la papa y las variables de proceso. La papa aporta los precursores en una concentración que depende de su variedad, de las condiciones de cosecha y de su almacenamiento postcosecha [Low *et al.*, 2006]. Las variables de proceso fundamentales son la temperatura del aceite, el tiempo de fritura u horneado y ciertas propiedades de la patata como pH, actividad de agua, capilaridad, porosidad, concentración de grupos amino y carbonilo [Gertz *et al.*, 2003]. Tanto en papas fritas como horneadas las condiciones de proceso y de la materia prima afectan los niveles de acrilamida en los productos finales.

De acuerdo a estudios realizados por Zubeldia y Gomar (2007) a muestras de papas fritas y de aperitivos fritos de la Comunidad Valenciana y su posterior comparación con organizaciones relacionadas con la seguridad alimentaria como la Agencia de Alimentos y Medicamentos (FDA) y la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) se obtuvieron los siguientes resultados.

**Tabla 4. Contenido de acrilamida en papas fritas y aperitivos de la Comunidad Valenciana**

	<b>n</b>	<b>Media</b>	<b>DE</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>Acrilamida en papas fritas (µg/kg)</b>					
<b>Comunidad Valenciana</b>	24	916	656	122	2880
<b>EFSA</b>	643	731	531	5	3770
<b>FDA</b>	60	613	517	117	2762
<b>Acrilamida en aperitivos (µg/kg)</b>					
<b>Comunidad Valenciana</b>	15	262	346	0	1325
<b>EFSA</b>	182	760	761	7	3436
<b>FDA</b>	48	300	358	0	1340
<b>DE: desviación estándar; EFSA: European Food Safety Authority; FDA: Food and Drug Administration.</b>					

Fuente: [Zubeldia y Gomar, 2007]

De la tabla anterior se puede observar que se presenta para el caso de la media de aperitivos en la Comunidad Valenciana y de la FDA en comparación con la EFSA un valor muy disperso, todo esto se presenta por la ausencia de normatividad en métodos de muestreo y su

forma de análisis por lo que se genera cierta limitación para la comparación de valores que han sido objeto de estudio en diferentes laboratorios.

Han sido múltiples trabajos que se han publicado demostrando como se pueden reducir los niveles de acrilamida en papas fritas con modificaciones en los procesos, pero se debe tener en cuenta las variedades de papa. De acuerdo a investigaciones realizadas por Elmore *et al.* [2015] a 20 variedades de papa se obtuvo lo siguiente.

**Tabla 5. Contenido de Acrilamida ( $\mu\text{g} / \text{kg}$ ) en 20 variedades de papa almacenadas a  $8^{\circ}\text{C}$**

<b>Variedad</b>	<b>2 meses almacenamiento</b>	<b>6 meses almacenamiento</b>
Hermes	1410 $\pm$ 372	1560 $\pm$ 499
Lady Claire	178 $\pm$ 71	138 $\pm$ 27
Lady Rosetta	340 $\pm$ 47	655 $\pm$ 271
Saturna	663 $\pm$ 69	422 $\pm$ 132
Verdi	119 $\pm$ 36	142 $\pm$ 55
Challenger	812 $\pm$ 371	1030 $\pm$ 586
Daisy	496 $\pm$ 114	1240 $\pm$ 504
Desiree	3460 $\pm$ 1220	4150 $\pm$ 1226
Fontane	550 $\pm$ 297	576 $\pm$ 241
Innovator	1850 $\pm$ 318	3660 $\pm$ 168
King Edward	1480 $\pm$ 468	1730 $\pm$ 531
Lady Blanca	3840 $\pm$ 2386	3500 $\pm$ 984
Lady Olympia	2190 $\pm$ 1424	1390 $\pm$ 924
Maris Piper	1860 $\pm$ 759	1300 $\pm$ 482
Markies	609 $\pm$ 219	624 $\pm$ 164
Pentland Dell	5540 $\pm$ 572	5180 $\pm$ 674
Ramos	833 $\pm$ 319	1200 $\pm$ 357
Russet Burbank	2690 $\pm$ 992	2870 $\pm$ 785
Umatilla Russet	3000 $\pm$ 559	2430 $\pm$ 1743
Harmony	2620 $\pm$ 493	3430 $\pm$ 778

Fuente: [Elmore *et al.*, 2015]

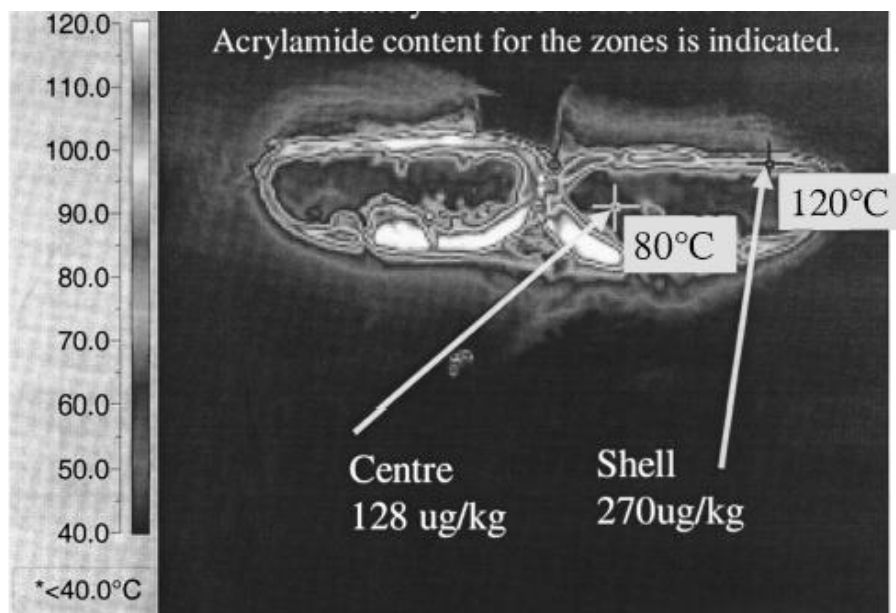
En la tabla anterior se presentaron las diferentes variedades de papa que fueron almacenadas a  $8^{\circ}\text{C}$  durante 2 y 6 meses las cuales posteriormente fueron fritas para determinar su contenido de acrilamida. Es notable que las desviaciones en ciertas variedades son grandes lo cual se debe a la gran variabilidad que se presentan en los cultivos y que hacen que algunas muestras presenten valores muy dispersos de la media. Con los resultados obtenidos se concluyó que el tiempo de almacenamiento no afecta significativamente el contenido, que muchas de las variedades de papa son apropiadas para producir papas fritas con contenidos relativamente bajos de acrilamida y que además cumplen con el valor de referencia

establecido por la Comisión Europea (1000µg/kg), pero las variedades Hermes, Desire, Innovator no son recomendables en comparación con variedades como Verdi y Fontane que presentaron bajos niveles de acrilamida ya que de acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 6 dichas variedades después de la fritura fueron las que presentaron menos niveles de acrilamida.

### 5.2.5.2 CEREALES

Los cereales son las semillas de las plantas gramíneas como trigo (*Triticum*), avena (*Avena sativa*), cebada (*Hordeum vulgare*), centeno (*Secale cereale*), etc, y son base de muchos alimentos que se consumen a diario. Como por ejemplo las hojuelas de cereales que por lo general son consumidos en los desayunos y que pasan por diferentes procesos. El primer proceso es la cocción de los granos a los cuales se les añade azúcares (jarabes) y luego las hojuelas se secan con aire caliente. Las características organolépticas como sabores, olores y colores se desarrollan por la reacción de Maillard en el proceso de tostado donde se presenta la formación de acrilamida [Taeymans *et al.*, 2004].

En la Figura 12 se muestra una imagen térmica de un cereal para desayuno que ha sido recién sacado del horneado, donde la temperatura del horno registró 220°C, pero la superficie de la hojuela no excedió los 120°C y el centro de la hojuela no excedió los 80°C debido a la evaporación del agua al interior del alimento. Este caso demuestra que la temperatura empleada en el sistema va a ser diferente a la temperatura interna del producto durante el tostado. Debido a que esta imagen térmica no presenta color se demarcan las temperaturas en el centro y la superficie de la hojuela.



**Figura 12. Imagen térmica de una sección transversal de una hojuela de cereal [Taeymans *et al.*, 2004]**

Como se observa en la Figura 12, la acrilamida se encuentra tanto en el centro como en la superficie de la hojuela pero en menor proporción en el centro (128 µg/kg) debido probablemente a la baja temperatura.

De acuerdo a experimentos realizados por Taeymans *et al.* [2004] se mantuvieron las condiciones de tostado constantes y las de cocción se variaron, mientras que la concentración de azúcar reductor fue extrema, obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 6. Contenido de acrilamida en hojuelas de cereal**

Presión y temperatura de cocción	Ciclo cocción granos (minutos)		Acrilamida (µg/kg)
	Sin azúcar reductor	Con azúcares reductores añadidos	
20 psi / 127°C	68	0	224
20 psi / 127°C	50	18	220
20 psi / 127°C	34	34	676
14 psi / 121°C	80	18	893

En la Tabla 6 se puede observar que la el mayor contenido de acrilamida presentado en la cocción de los granos se generó a una presión de 14 psi con una temperatura de 121°C y cocinados a mayor tiempo sin azuceres reductores en cambio a 20 psi con una temperatura mayor el contenido de acrilamida fue menor (220 µg/kg), por lo tanto la formación de acrilamida no sólo va ligada con la etapa de tostado ya que durante la cocción de los granos puede existir variabilidad de acuerdo a las condiciones empleadas y pueden verse afectados los niveles de acrilamida.

La asparagina de acuerdo a la variedad del trigo puede estar más disponible en unas en comparación con otros como se observa en la siguiente tabla.

**Tabla 7. Contenido de asparagina en variedades de trigo de Europa**

<b>Variedad trigo</b>	<b>Asparagina (mg/kg)</b>	<b>Origen</b>	<b>Variedad trigo</b>	<b>Asparagina (mg/kg)</b>	<b>Origen</b>
Abbot	329	UK	Hunter	151	UK
Abbot	334	UK	Isengrain	199	Francia
Abbot	344	UK	Kris	174	Alemania
Abbot	664	UK	Malacca	176	UK
Abbot	344	UK	Mercia	168	UK
Admiral	206	UK	Mercia	210	UK
Apollo	214	UK	Napier	214	UK
Avalon	266	UK	Option	187	UK
Buster	295	UK	Orvantis	145	Francia
Caphorn	150	Francia	Piko	256	Alemania
Chablis	102	UK	Rialto	178	UK
Charger	192	UK	Rialto	244	UK
Claire	202	UK	Rialto	251	UK
Calire	232	UK	Rialto	277	UK
Claire	163	UK	Rialto	286	UK
Consort	153	UK	Savannah	213	UK
Consort	273	UK	Shamrock	175	UK
Consort	302	UK	Shango	443	UK
Consort	326	UK	Slejpner	274	UK
Equinox	163	UK	Soissons	226	Francia
Folio	198	Francia	Tremie	179	Francia
Frelon	113	Francia	Vault	74	UK
Hereward	219	UK			

Fuente: [Taeymans *et al.*, 2004]

Se debe tener en cuenta que los datos sobre las variedades de trigo y sus niveles de asparagina presentados anteriormente representan la cosecha de un año y pueden existir diferencias de un año a otro por lo tanto también pueden presentarse cambios en los niveles de asparagina dependiendo de las condiciones de cultivo.

Por tanto en cereales se deben considerar entre otros aspectos el cultivo del trigo, los procesos de cocción y tostado y la disponibilidad de los precursores en la formación de acrilamida que de acuerdo a la Comisión Europea presenta una media de 400 µg/kg en cereales para el desayuno.

Otros productos a base de cereales son los pasteles y las galletas de consumo masivo por sus atractivos sabores y olores. El proceso de horneado determina sus características organolépticas y es la principal operación que se realiza durante la fabricación. Los pasteles son horneados con temperaturas superiores a 120° que en conjunto con los ingredientes empleados en la elaboración de la masa son de importancia para la formación de acrilamida

debido a la asparagina libre y a los azúcares reductores que puedan tener. Por ejemplo los ingredientes para realizar las galletas son harina, sacarosa, huevos y grasa. Las harinas de cereales contienen gran cantidad de aminoácidos libres entre los que se incluye la asparagina precursor de la acrilamida pero la cantidad disponible depende del tipo de harina [Miśkiewicz *et al.*, 2012].

De acuerdo a estudios de Fredriksson *et al.* [2004], la concentración de asparagina en la harina de trigo es de 0,5 g/kg y en la harina de centeno 1,1 g/kg y el contenido más bajo lo presentó la harina de trigo tamizada (0.2 g/kg). Por lo tanto, las condiciones de la cosecha, cultivo, almacenamiento y procesamiento de los granos intervienen en la cantidad de asparagina libre en las harinas.

Investigaciones realizadas por Claus *et al.* [2006] muestran que panes producidos a partir de harinas del año 2003 mostraron niveles de acrilamida más altos en comparación con el 2004, debido a condiciones de luz y temperatura durante el período de cultivo, además los niveles de aminoácidos libres y azúcares reductores en los granos de cereales y harinas también se ven afectados por fertilizantes nitrogenados.

Se ha demostrado que en la masa de galletas no existe presencia de acrilamida puesto que en esa etapa no se ha generado calor suficiente para que ocurra la reacción entre los precursores, por tanto, la producción de acrilamida depende de la temperatura y el tiempo del horneado a los que son sometidos los productos de pastelería. En la Tabla 8 se muestran los resultados de un ensayo de panificación industrial realizado en galletas comerciales [Miśkiewicz *et al.*, 2012].

**Tabla 8. Variación de los niveles de acrilamida en galletas comerciales**

Producto	n	Rango (µg/kg)	Promedio (µg/kg)
Galletas integrales	13	240-560	435
Galletas	9	170-430	324

Fuente: [Taeymans *et al.*, 2004]

Como se puede observar hay mayor presencia de acrilamida en galletas integrales debido al tipo de harina empleada en su elaboración. Valores reportados por la Comisión Europea indican que las galletas y panes presentan una media de 500 µg/kg de acrilamida que no es muy alejada de los valores encontrados en el estudio de galletas comerciales realizado por Ishihara *et al.* [2006].

De acuerdo a ensayos realizados por Taeymans *et al.* [2004] se ha evaluado la formación de acrilamida en relación con la temperatura de horneado y el contenido de humedad final como se muestra en la siguiente tabla.



**Tabla 9. Concentración de acrilamida ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )\* en galletas en relación con la temperatura y el contenido de humedad final**

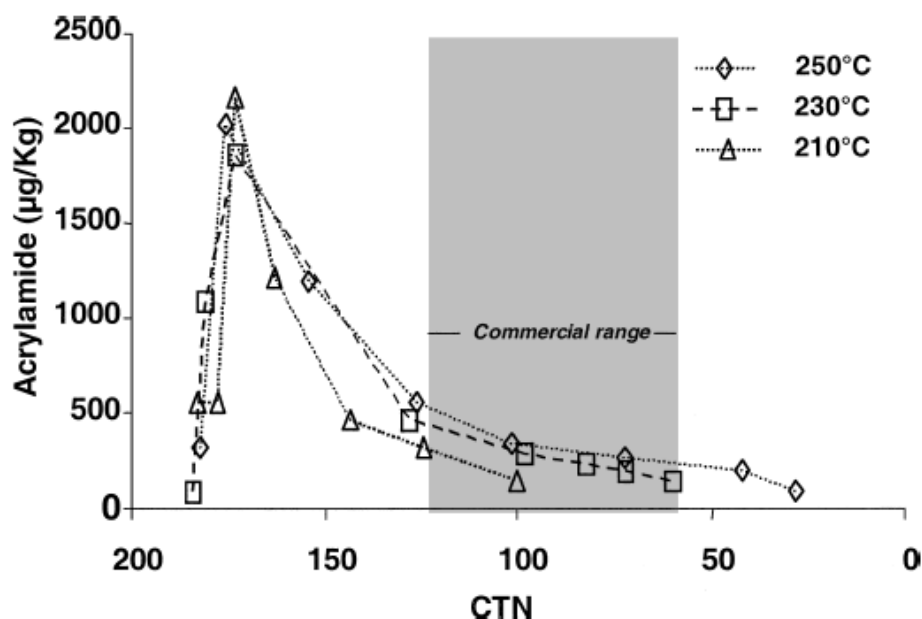
Temperatura $^{\circ}\text{C}$	Contenido de humedad final		
	10%	6%	2%
120	<20	<20	165
160	<20	28	229
200	<20	39	363

\*Promedio de 3 determinaciones independientes.

Se debe tener en cuenta que el contenido final de humedad deseado en galletas comerciales es del 2%; como se puede observar al 10% de humedad el contenido de acrilamida es muy bajo, en un 6% de humedad fue detectada a temperatura elevadas pero en cantidades moderadas y ya en el contenido de humedad deseado tuvo una variación de menor a mayor a medida que se incrementó la temperatura del horneado.

### 5.2.5.3 CAFÉ

Otro de los productos analizados y que presenta altos niveles de acrilamida es el café, su proceso de tostado se realiza a temperaturas entre 220 y 250 $^{\circ}\text{C}$ , por lo tanto el tiempo y la velocidad del tostado juegan un papel importante en las propiedades sensoriales como aroma, color y sabor. Los granos de café se someten a temperaturas relativamente altas en comparación con otros alimentos, por lo tanto se puede pensar que es una vía clara para que se presente la reacción de Maillard y se forme acrilamida [Stadler y Scholz, 2004]. Sin embargo la concentración de asparagina libre en granos de café verde es de 30 a 90 mg / 100g y de acuerdo a experimentos realizados se ha demostrado que la acrilamida se degrada durante el tostado como se observa en el siguiente perfil de formación a diferentes temperaturas de tostado.



CTN: Número de prueba de color

**Figura 13. Formación de acrilamida en el tostado del café [Taeymans *et al.*, 2004]**

En el anterior perfil se observa como la cantidad de acrilamida aumenta exponencialmente al inicio del tostado alcanzando un máximo aparente y a continuación, disminuyendo rápidamente a medida que la tasa de degradación es superior a la tasa de formación.

Los siguientes factores afectan en la formación de acrilamida en el café:

- **Especie de café:** El café Arábico y Robusta son las dos especies de más alta importancia agronómica y comercial en el mundo. Se diferencian en su morfología, las características organolépticas, la composición química y su valor (siendo el arábico de mayor precio) [Alves *et al.*, 2011].

Los precursores de la acrilamida en el café son sus azúcares reductores y la asparagina presente en el grano antes de su tostado. La asparagina libre resulta ser menor en el Arábico en comparación con Robusta y se convierte en el factor limitante para la formación de acrilamida en el café, por lo cual el Robusta presenta mayores niveles de acrilamida cuando el café ya se ha tostado con un valor aproximado de 500 g/kg frente a 230 g/kg en el Arábico [Soares *et al.*, 2015].

- **Proceso de pos cosecha:** Existen tres procedimientos principales que se pueden llevar a cabo para obtener los granos de café: El método seco (café natural), en el cual las cerezas se secan al sol y luego se descascaran, el proceso húmedo (café lavado) que aporta al café mejor calidad, en donde las cerezas maduras y frescas se despulpan, se fermentan, se lavan y se secan. Y el tercer método llamado semi-lavado o

despulpado natural (café natural despulpado) en el cual los frutos se despulpan y se secan sin ser sometidos a una etapa de fermentación [Alves *et al.*, 2011].

El tipo de proceso al que se somete el café después de la cosecha determina la calidad de los granos de café y de la bebida. Sin embargo hay una diferencia de composición de sólidos solubles entre el café natural y el lavado, siendo menor en este último [Illy y Viani, 2005]. Además los precursores de acrilamida como los carbohidratos y los aminoácidos libres son diferentes en cafés verdes procesados. Por lo general los aminoácidos presentes en el café contribuyen al desarrollo del aroma del café durante el tostado, el cual es un atributo importante en este producto, sin embargo la asparagina ayudará a producir acrilamida. Estudios realizados por Dias [2010] han demostrado que el despulpado de los frutos permite una reducción de niveles de asparagina, por lo tanto en el tostado va haber menor formación de acrilamida.

- **Granos defectuosos de café:** El número de granos defectuosos que se pueden presentar en la producción es un factor que contribuye a la formación de acrilamida, pero la ventaja es que los granos son clasificados por ser un parámetro de control de calidad. Los granos de café defectuosos que aún no están maduros (verdes) se caracterizan por contener más asparagina libre [Mazzafera, 1999].
- **Condiciones del tostado:** Concentraciones altas de acrilamida se forman durante los primeros minutos del tostado pero al aumentar el tiempo se degrada al igual que empiezan a formarse compuestos de sabor no deseados. La acrilamida no se acumula durante el tostado ya que su formación y degradación se producen simultáneamente [Lantz *et al.*, 2006].

En el café la formación de acrilamida no parece verse afectada por el contenido de azúcares reductores y parece estar solamente correlacionada con la concentración de asparagina en los frutos verdes. El optimizar las condiciones de tostado para reducir la acrilamida en los granos incluye mantener los estrictos atributos de calidad del café [Guenther *et al.*, 2007].

Granby y Fagt [2004] no encontraron diferencias significativas entre las técnicas de preparación de la bebida, pero encontraron contenidos más altos de acrilamida en granos de café medio tostados (10 µg/l) en comparación con los tostados por completo (5 µg/l). De acuerdo con la Comisión Europea, el café tostado tiene un nivel de acrilamida media de 450 µg/kg mientras que el café instantáneo puede contener 900 µg/kg.

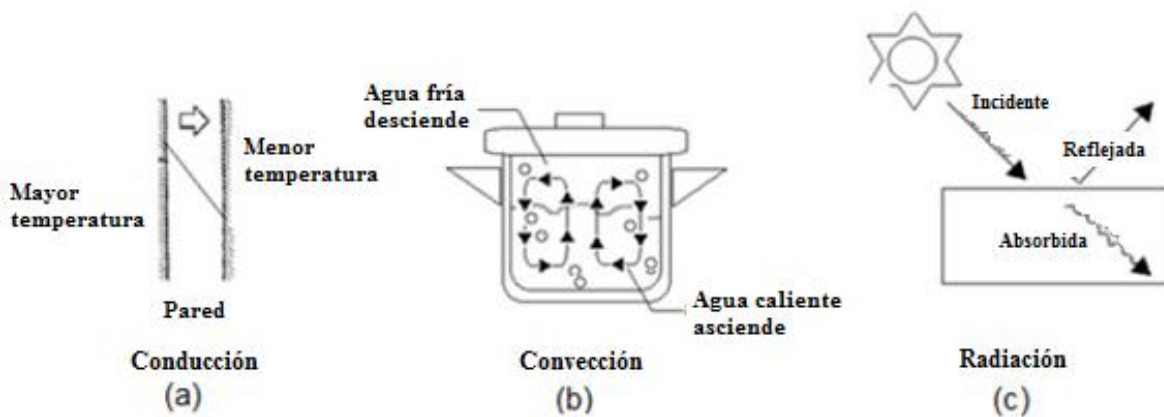
- **Preparación de la bebida:** Debido a que la acrilamida es soluble en agua se traslada a la bebida final de café que se prepara, sin embargo el nivel que se presenta en esta depende del método de preparación que comprende la relación de café/agua que se emplee. Los niveles de acrilamida encontrados en la bebida preparada en cafeteras se encuentra entre 2 y 16 µg/l [Granby y Fagt, 2004].

El café como parte de la dieta diaria de las personas contribuye a la ingesta diaria de acrilamida y es una variable que depende de las condiciones demográficas y del consumo de la bebida por parte de la población. Como ejemplo, el consumo de café en adultos representa alrededor del 28% de la ingesta de acrilamida en Noruega, 39% en Suecia, 13% en Estados Unidos, 20% en Dinamarca, 36% en Suiza, y 28% en Francia [Morales y Mesias, 2015].

## 6 RELACIÓN DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN LA FORMACIÓN DE ACRILAMIDA

La aplicación de calor es el proceso tecnológico más simple para conseguir la destrucción e inactivación de microorganismos y enzimas que se encuentran en los alimentos que pueden ser nocivos o no deseados, o para cambiar las propiedades fisicoquímicas (ej. textura). Durante el tratamiento térmico se pueden presentar tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

La conducción ocurre cuando se transfiere energía de una región de alta temperatura a una región de baja temperatura (gradiente de temperatura). La convección es la transferencia de calor entre porciones calientes y frías de un gas o un líquido en movimiento, además incluye el intercambio de energía entre una superficie sólida y un fluido. La radiación no requiere un medio físico y es la transferencia de energía por medio de ondas electromagnéticas [Geankoplis, 2006]. A continuación en la Figura 14 se presentan ejemplos de los mecanismos de transferencia de calor. Los tratamientos térmicos tradicionales involucran mecanismos de conducción y convección pero existen nuevas tecnologías que emplean la radiación.



**Figura 14. Mecanismos de transferencia de calor [Pérez y Sosa, 2013]**

Existen diversas tecnologías que se distinguen por el objetivo y la finalidad de sus procesos, pero siempre en función de la eficiencia del tratamiento teniendo en cuenta dos factores: El nivel de la temperatura y la intensidad del calor. Los métodos empleados en la industria alimentaria dependen de la intensidad del tratamiento térmico como la cocción que logra la

reducción microbiana pero cuyos objetivos son la variación de las propiedades físicas de los alimentos y en ocasiones formación de compuestos no deseados como la acrilamida debido a la temperatura y tiempo del tratamiento [Gutiérrez, 2005].

## **6.1 COCCIÓN**

El objetivo principal de la cocción es mejorar la palatabilidad y las cualidades microbiológicas en los alimentos. La cocción se puede realizar con calor seco (temperaturas mayores a 100°C) como en el horneado y el tostado, con calor húmedo al vapor o mediante aceites como la fritura [Orrego, 2003].

Se debe tener en cuenta que una cocción excesiva genera pérdida de micro nutrientes importantes [Gouado *et al.*, 2011], por lo tanto durante este procedimiento pueden presentarse pérdidas de vitaminas y más si se consume el producto final sin el caldo donde se llevó a cabo la cocción. Sin embargo algunos nutrientes aumentan su biodisponibilidad después de este proceso, también se eliminan compuestos tóxicos y se desnaturalizan proteínas, además se aumenta la digestibilidad de las proteínas y se mejoran las características organolépticas, pero también se generan compuestos no deseados como la acrilamida [Gil y Ruiz, 2010].

El mecanismo de transferencia de calor en la fritura es la convección, pero en caso de presentarse partículas sólidas en el medio (aceite) la transferencia en estas es por medio de la conducción. En el caso del horneado o tostado la transferencia de calor se da por conducción. Cuando el calor ha sido transferido del medio de cocción a la superficie del alimento, este continúa penetrando hacia el centro, pero la eficiencia de este proceso depende del grado de penetración del calor al centro del alimento [McGee *et al.*, 1999]. A continuación se presentan los dos tipos de cocción que involucran calor seco, calor húmedo o aceite como medio y que ayudan a la formación de acrilamida en alimentos.

### **6.1.1 HORNEADO**

El horneado es uno de los procesos más utilizados para la producción de alimentos. Cuando se aplica este tratamiento, se presenta una pérdida de proteínas debido a reacciones de Maillard en la corteza de los productos, pero al mismo tiempo al desnaturalizarse las proteínas se aumenta su digestibilidad [Gil y Ruiz, 2010]. El horneado con temperaturas entre 140-200 °C, se aplica normalmente a frutas y alimentos a base de harinas. Cuando se emplean temperaturas superiores a 200°C en la superficie de los alimentos algunos restos de aminoácidos se descomponen y se pirolizan, obteniéndose compuestos mutagénicos o no deseados como la acrilamida. Las altas temperaturas utilizadas en estos procesos producen también la pérdida de vitaminas termolábiles.

Durante la cocción, el calor se transfiere principalmente por convección del medio de calentamiento, por la radiación de las paredes del horno y por conducción como resultado del calentamiento por contacto con la superficie caliente en la parte inferior. El horneado más empleado es por convección forzada haciendo pasar aire caliente [Dermirkol *et al.*, 2006].

Este tratamiento se caracteriza por la baja humedad y las altas temperaturas; a pesar de esto es un proceso lento ya que la transferencia de calor por convección del aire o radiación por las paredes de horno es ineficiente [McGee *et al.*, 1999].

### **6.1.2 FRITURA**

La fritura está definida como la cocción en aceite o grasa caliente a temperaturas elevadas, en donde el aceite actúa como transmisor del calor produciendo un calentamiento rápido y uniforme en el alimento [Fillion y Henry, 1998]. Durante este proceso, el alimento al entrar en contacto con la grasa o el aceite a elevadas temperaturas puede presentar un gran número de reacciones complejas, como la disminución de los componentes nutricionales y aumento en la formación de compuestos tóxicos o compuestos no deseados como la acrilamida que en algún momento pueden pasar al alimento frito y ser ingeridos por el consumidor [Romero *et al.*, 2006].

La fritura es considerada como un proceso que incluye deshidratación con tres características que lo distinguen: El corto tiempo de cocción debido a la rápida transferencia de calor que se logra con el aceite caliente, la temperatura al interior del alimento es menor a 100°C, y la alta deshidratación, siendo el agua sustituida en parte por aceite [Suárez *et al.*, 2004]. La velocidad de transferencia de calor al alimento depende de la diferencia de la temperatura entre éste y el medio así como del coeficiente de conductancia térmica superficial, por lo tanto la transferencia de calor en este tratamiento es por convección en la superficie del alimento y por conducción en el interior del mismo [Alvis *et al.*, 2009].

Durante el proceso de fritura, el calor se transfiere del aceite hacia la superficie del alimento, mientras que la humedad del alimento se transfiere desde el interior a la superficie. Por lo tanto se alcanzan elevadas temperaturas y condiciones de baja humedad, logrando características organolépticas deseables. Estos cambios deseables generados en los alimentos cocinados son un efecto combinado de la formación de una capa externa crocante, pérdida de humedad, ganancia de aceite, desnaturalización de proteínas e innumerables cambios en el interior del alimento como la formación de acrilamida debido a las altas temperaturas que generan reacciones en el interior del alimento [Yıldız *et al.*, 2007].

Debido al auge de los pasabocas (snacks) en la industria de alimentos el mercado de alimentos fritos ha adquirido gran importancia y se encuentra creciendo cada día más [Franco Velez *et al.*, 2008]. Pero se debe tener en cuenta que existe una preocupación creciente por la calidad de los alimentos, siendo importante considerar los aspectos del proceso que inciden en la misma, y en cuanto a los parámetros de calidad cabe considerar los organolépticos y los nutricionales donde se considera también lo saludable o perjudicial. Respecto a las características organolépticas el consumidor busca que estas le recuerden al producto en su estado original o a determinados atributos tales como la crocancia, en cuanto a los atributos nutricionales cabe señalar la preocupación de los consumidores por la composición [Tirado Armesto *et al.*, 2012].

Los tratamientos térmicos mencionados anteriormente son empleados durante el procesado y cocinado o en la conservación de diversos alimentos. La fritura, tostado, horneado pueden llegar alcanzar temperaturas de hasta 200°C, que conllevan a una serie de transformaciones en el alimento generando nuevos compuestos que inciden en la calidad y aceptabilidad del producto. Sin embargo el empleo de altas temperaturas en combinación con otros factores externos al alimento, puede dar lugar a la formación de compuestos tóxicos que reduzcan el valor biológico, incidiendo en la seguridad de los mismos. Estas sustancias químicas se denominan contaminantes químicos de procesado. Dentro de la gran variedad de contaminantes químicos de procesado están incluidos las aminas heterocíclicas, los hidrocarburos aromáticos policíclicos, las nitrosaminas y la acrilamida.

Como se ha mencionado anteriormente existe una gran dependencia de la temperatura en la formación de acrilamida, ya que en alimentos crudos o que no han sido sometidos a ningún tratamiento térmico, los niveles detectados son inferiores a 5 µg/kg. En la Tabla 10 se presentan los resultados de experimentos realizados por Tareke *et al.* [2002] a diferentes productos alimenticios en diferentes preparaciones.

**Tabla 10. Niveles de acrilamida de diferentes productos alimenticios (µg/kg)**

<b>Alimentos freídos</b>	<b>A-1</b>	<b>A-2</b>	<b>A-5</b>	<b>Mediana</b>
Carne de res molida	20; 22		15; 15; 17	17
Pollo molido		16; 41		28
Pescado molido	<5; <5	11		
Cerdo molido	52			
Carne de soya	15; 16			16
Papa rallada	730; 780	447	394; 310	447
Papa hervida			201; 144	172
Remolacha rallada		810; 890		850
Espinaca rallada		112		
<b>Alimentos calentados en microondas</b>		<b>A-2</b>		<b>Mediana</b>
Pescado		< 5; < 5		
Papa rallada		455; 650		551
<b>Alimentos hervidos</b>	<b>A-2</b>	<b>A-4</b>	<b>A-5</b>	<b>Mediana</b>
Papa	< 5; < 5	< 5; < 5	< 10	
Caldo de papa	< 5; < 5	< 5; < 5		
Carne de res	< 5; < 5	< 5; < 5	< 5; < 5	
Caldo de carne		< 5	< 5; < 5	
Pescado	< 5; < 5			
Caldo de pescado	< 5; < 5			

A-1, A-2, A-4, A-5 denotan diferentes repeticiones

De acuerdo a la información anterior se puede observar que en productos hervidos el nivel detectado de acrilamida es inferior a 5µg/kg, al igual que el pescado sometido a fritura y a calentamiento con microondas debido a su bajo contenido de carbohidratos, en cambio los

alimentos sometidos a freído presentan los niveles más altos de acrilamida que ocurre debido a las temperaturas que se alcanzan en este tratamiento, a la rápida transferencia de calor y al medio en el cual se realiza. En el proceso de hervido, el alimento al entrar en contacto con el agua aumenta su humedad y por lo tanto impide que la temperatura interna del producto alcance la temperatura apropiada para la formación de acrilamida, la cual debe ser mayor de 100°C, de acuerdo a estudios realizados en papas fritas calentadas a condiciones controladas de laboratorio [Tareke *et al.*, 2002].

## **7 ALTERNATIVAS PARA LA REDUCCIÓN DE ACRILAMIDA**

La combinación de pre tratamientos con variación de temperaturas, adición de ingredientes o sustitución, reducción de precursores y control de las variables de los procesos han permitido reducir el contenido de acrilamida a nivel de laboratorio. Respecto a pre tratamientos se han evaluado los efectos del lavado a los alimentos antes de ser sometidos a tratamientos térmicos y se ha evidenciado una disminución de los azúcares reductores. Ishihara *et al.* [2006] realizaron estudios a temperaturas entre 20°C y 80°C para evaluar el efecto de la temperatura del agua de lavado en la cantidad de azúcares reductores. La temperatura del agua de inmersión no afecta el contenido de agua interna presente en el material sometido a este proceso; pero sí afecta el contenido de aminoácidos, lo que es positivo desde el punto de vista de la reducción de acrilamida, pero negativo desde el punto de vista organoléptico, ya que afecta a los componentes que determinan la calidad sensorial [Ishihara *et al.*, 2006]. Por lo tanto en búsqueda de diferentes medios para lograr una reducción significativa de acrilamida en alimentos que son sometidos a tratamientos térmicos se han empleado distintos métodos como pretratamientos, radiaciones, control de temperaturas en los procesos de producción, etc.

### **7.1 REDUCCIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE PRECURSORES**

Realizar una selección de materias primas como cereales y papas que contengan bajos niveles de asparagina y de azúcares reductores puede contar como un factor importante en la reducción de acrilamida, lo cual depende de las condiciones de precosecha como la madurez del cultivo, la temperatura durante el crecimiento, la nutrición mineral, y el riego, y de los factores postcosecha como los esfuerzos mecánicos y las condiciones de almacenamiento. Por ejemplo, el trigo cultivado en suelos con pocos sulfatos posee 30 veces mas asparagina disponible en comparación con suelos fertilizados ricos en sulfatos. Los productos horneados preparados a partir de un alto contenido de este aminoácido tuvieron entre 2600 a 5200 µg/kg de acrilamida, mientras aquellos preparados con trigo cultivado en condiciones normales tuvieron entre 600 y 900 µg/kg.

Algo similar ocurre con las papas, que dependiendo de su variedad presentan mayor o menor cantidad precursores, como lo muestran Elmore *et al.* [2015] y Muttucumaru *et al.* [2013] en sus estudios. Estos autores demuestran que al aplicar nitrógeno en los suelos donde se cultiva papa se aumenta el potencial de formación de acrilamida en papas fritas, pero al aplicar azufre se reducen las concentraciones de glucosa y por lo tanto se mitiga la formación de acrilamida en un 27% en las papas fritas. Al someter los suelos a fertilización con nitrógeno se induce a



que los aminoácidos y proteínas aumenten y por consiguiente se incrementan los niveles de acrilamida [Friedman y Levin, 2008].

Otro aspecto que se debe considerar son las condiciones climáticas ya que fuertes veranos (por encima de 30°C) dan lugar en los cultivos de papa a contenidos reducidos de azúcares y a temperaturas cercanas a los 25°C los niveles son elevados como consecuencia de la respiración de la planta la cual tiene un efecto negativo sobre la tasa de biosíntesis del almidón, por lo tanto los niveles de azúcares reductores serán menores a temperaturas intermedias (15-25°C) [Morales *et al.*, 2008].

Otro aspecto que debe tenerse en cuenta con la materia prima es la temperatura de almacenamiento, la cual en papas, suele ser por debajo de 10°C y de esta forma el almidón se comienza a degradar a glucosa, por lo tanto los niveles de acrilamida aumentan. Sin embargo en estudios llevados a cabo por Friedman y Levin [2008] plantean reacondicionar las papas a un almacenamiento a 15°C antes del freído para reducir el contenido de azúcares y en consecuencia la formación de acrilamida. De acuerdo a estudios realizados por Biedermann-Brem *et al.* [2003] las papas que son adecuadas para someter a freído o tostado deben contener menos de 1 g/kg de azúcares reductores (peso fresco) para evitar niveles altos de acrilamida en el producto final.

Por lo tanto los estudios citados indican que las variedades cultivadas en diferentes partes del mundo presentan diferentes composiciones al igual que diversos cambios durante su almacenamiento que deben tenerse en cuenta para mitigar la formación de acrilamida.

## 7.2 CONDICIONES DE PROCESAMIENTO

- **Enzimas:** En cuanto a métodos para disminuir la asparagina, se propone hidrolizarla mediante pH ácido o catalizarla por asparaginasa [Friedman, 2003]. En el caso de la elaboración de productos de panadería puede emplearse la fermentación de las masas de trigo o centeno lo cual conlleva a una reducción del contenido de asparagina siendo proporcional con el tiempo de fermentación [Friedman y Levin, 2008].
- **Temperatura y tiempo del tratamiento térmico:** La manera como el calor es transmitido a los alimentos a través de diferentes tratamientos térmicos como freído, horneado, asado, o tostado tiene gran impacto en la formación de acrilamida. Sin embargo las condiciones de procesamiento como la temperatura y el tiempo de exposición al calor son factores que afectan directamente la formación y degradación de la acrilamida en los alimentos. En el caso de horneado de panes, los niveles de acrilamida son mayores en la corteza del pan en comparación con el interior debido a las temperaturas alcanzadas, y al aumentar el tiempo del tratamiento térmico también se generan mayores niveles de acrilamida.

El pardeamiento que sufren los alimentos sometidos a tratamientos térmicos suele emplearse como un indicador visual del grado de cocción. De acuerdo a estudios

realizados por Jackson y Al-Taher [2005] en papas fritas, los niveles de acrilamida tienden a ser más bajos en papas al final del freído cuando presentan un color dorado, que cuando la superficie tiende a un color marrón (niveles mayores de 1000 µg/kg). Este oscurecimiento es causado al aumentar la temperatura y el tiempo del tratamiento térmico. Lo mismo ocurre en rebanadas oscuras de pan tostado a 143-223°C (niveles entre 43,7 y 610,7 µg/kg) en comparación con rebanadas doradas de pan tostado a 120-143°C (niveles de 10,9 – 213,7 µg/kg) y tostadas oscuras preparadas con harina de papa que pueden llegar a tener valores por encima de 600 µg/kg. Sin embargo en productos de panadería que son sometidos a horneado existe mucha variación en el grado de pardeamiento superficial, en comparación con la fritura. Taubert *et al.* [2004] estudiaron el impacto del pardeamiento en la formación de acrilamida en papas con diferentes áreas superficiales, y encontraron una correlación lineal entre los niveles de color dorado y la concentración de acrilamida en rodajas de papas fritas (baja SA:V), pero en muestras de papa con alta relación superficie-volumen (papas ralladas) el color no se relacionó con los niveles de acrilamida debido a la degradación que presenta la acrilamida. Por lo tanto, la determinación del grado de pardeamiento superficial del alimento es un buen método para estimar y controlar la formación de acrilamida durante la cocción de acuerdo al tiempo y temperatura de exposición.

En investigaciones se ha encontrado que más del 99% de acrilamida en el pan se encuentra en la corteza [Surdyk *et al.*, 2004], por lo tanto al realizar un raspado de la superficie del pan se logra una reducción de acrilamida de 483 µg/kg a 181 µg/kg en un pan tostado hecho de harina de papa [Jackson y Al-Taher, 2005].

De acuerdo a estudios realizados en productos de panadería, emplear temperaturas bajas por tiempos prolongados duplica la cantidad de acrilamida en comparación con una cocción a temperatura alta y corto tiempo [Amrein *et al.*, 2004]. Por lo tanto se debe emplear el tiempo y la temperatura óptima para conseguir la textura y el color superficial deseado, ya que una alta temperatura y una pequeña diferencia de tiempo determinan si el contenido de acrilamida queda por debajo de 100 o excede 1000 µg/kg. De acuerdo a estudios realizados por Grob *et al.* [2003] en papas fritas, se puede lograr una reducción del contenido de acrilamida a 40-70 µg/kg empleando una temperatura del aceite a 170°C y terminar el proceso de cocción cuando se tornen dorados los bordes de las papas, ya que de acuerdo a estudios realizados por Pedreschi *et al.* [2004] al incrementar la temperatura de 150°C a 190°C la formación de acrilamida se incrementa drásticamente. En el caso del horneado se deben emplear temperaturas inferiores a 220°C y en alimentos a base de cereales como panes y galletas se debe hornear hasta llegar a los niveles de humedad apropiados del producto y dorar en lo mínimo posible la superficie de los productos. Por lo tanto la temperatura adecuada para mantener niveles de acrilamida bajos depende también de la temperatura del medio una vez que ingresa el alimento, de las características de transferencia de calor entre el medio y el alimento, y de la cantidad de alimento en relación con el medio.

- **Humedad:** El contenido de humedad de los alimentos antes de procesarlos también es un aspecto que debe tenerse en cuenta en la formación de acrilamida, ya que una baja humedad hace que su desarrollo sea mayor, en cambio en productos con humedades altas tanto el pardeamiento como el contenido de acrilamida disminuye [Friedman y Levin, 2008]. Por lo tanto al variar la humedad se presentan cambios en el color de los productos y es necesario buscar un equilibrio en los métodos de cocción para no alterar la calidad del producto final. De acuerdo a estudios realizados por Ahrné *et al.* [2007] el realizar un horneado con vapor genera valores bajos de acrilamida y al mismo tiempo un color aceptable en panes.
- **Fermentación:** En productos de panificación se ha logrado establecer que el tiempo de fermentación es una condición importante que puede generar una disminución de acrilamida en los productos finales, tal como lo demuestran estudios realizados por Friedman y Levin [2008] en masas de panes hechas con harina de centeno o de trigo, en las cuales a medida que se aumenta el tiempo de fermentación los niveles de asparagina se reducen y por lo tanto la acrilamida en los panes después de su horneado disminuye 87% en el pan de trigo y 77% en el pan de centeno. Y en ensayos realizados en galletas se redujo al triple el contenido de asparagina después de 100 minutos de fermentación [Lineback *et al.*, 2012].
- **Fritura al vacío:** Como se dijo anteriormente en los procesos de fritura, la temperatura y el tiempo son factores que afectan el contenido de acrilamida y de acuerdo a investigaciones realizadas por Granda *et al.* [2004], la fritura al vacío reduce la formación de acrilamida en 94% en papas fritas en comparación con la fritura tradicional, manteniendo atributos como el color y la textura. En ensayos realizados al reducir la temperatura de freído de 180°C a 165°C, el contenido de acrilamida se redujo 51% en la fritura tradicional y al disminuir la temperatura de 140°C a 125°C en la fritura al vacío, el contenido se redujo 63%. Esta opción de freído se convierte en una buena opción de proceso para emplear temperaturas más bajas al disminuir el punto de ebullición del agua que contienen los alimentos y contrarrestar los niveles de acrilamida.

### 7.3 PRE TRATAMIENTOS

Se han estudiado pre tratamientos como lavado y remojo los cuales han resultado ser eficaces en la reducción de formación de acrilamida. Al sumergir rodajas de papa en agua a temperatura ambiente por quince minutos antes del freído reduce 63% el contenido de acrilamida [Jackson y Al-Taher, 2005]. Del mismo modo Grob *et al.* [2003] demostraron que al sumergir rodajas de papas en agua fría o caliente (escaldado) durante 15 minutos antes del freído se obtienen papas fritas con sabor y textura aceptables y con la mitad del contenido de acrilamida en comparación con las no sometidas al pre tratamiento, el cual tiene como fin lixiviar la asparagina y los azúcares reductores de la superficie de la papa como se muestra en la Tabla 11. Esto también fue demostrado por Pedreschi *et al.* [2004] quienes a través del escaldado redujeron en promedio un 76% del contenido de glucosa y un 68% de asparagina.

Sin embargo, Friedman y Levin [2008] establecieron que al escaldar (95°C) durante ocho minutos se retira mucha más glucosa y asparagina en las papas en comparación a sumergirlas en agua a temperatura ambiente disminuyendo la acrilamida en un rango del 79-94%.

**Tabla 11. Extracción de precursores de acrilamida en papas**

	Extracción (%)		
	Asparagina	Fructosa	Glucosa
Agua fría, 30 min	10	12	6
Agua de caldera, 15 min	14	14	8
Agua a 80°C, 2 min	53	54	51
Agua hervida, 2 min	63	61	61

Al emplear agua fría sólo se logra una extracción del 10%, que es muy similar a la reducción que se logra con agua de caldera pero a temperaturas más altas. Aunque la extracción fue más eficiente con agua a alta temperatura, las características organolépticas no fueron aceptables.

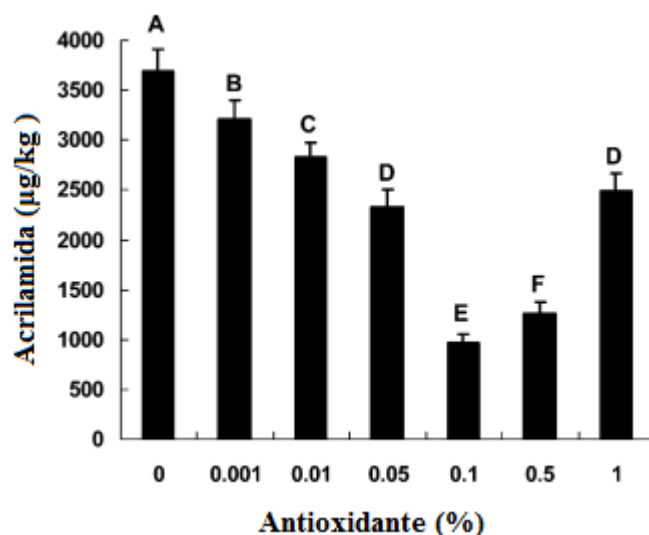
Otro pre tratamiento estudiado ha sido el lavado y remojo con soluciones ácidas para reducir los niveles de acrilamida, como lo observaron Jackson y Al-Taher [2005]. Al remojar papas en vinagre (proporción 1 vinagre: 3 agua) se redujo el potencial de formación de acrilamida en 75%. Jung *et al.* [2003] demostraron que al sumergir chips de maíz en soluciones de ácido cítrico al 0,2% o papas en soluciones del 1 y 2% durante una hora antes del freído u horneado inhibió la formación de acrilamida en 82,2%, 73,1% y 79,7%, respectivamente. Y de acuerdo a Pedreschi *et al.* [2004] el sumergir papas en soluciones de ácido cítrico (10 y 20g/L) antes de un freído a 150°C se reduce la formación de acrilamida en 70%. El uso de estos lavados ácidos provoca un descenso del pH además de pérdidas de asparagina y azúcares reductores que favorece la reducción de acrilamida. El sumergir las papas en una solución de cloruro de calcio también ha sido estudiado en la mitigación de acrilamida, y se ha encontrado que se reduce 95% durante el freído de papas sin alterar la calidad sensorial de las papas fritas, esta inhibición ha sido atribuida a la presencia de calcio el cual impide la formación de la base de Schiff [Morales *et al.*, 2008].

La combinación de escaldado a 90°C por un minuto con remojo en soluciones de ácido cítrico al 1% por una hora fue estudiada por Masson *et al.* [2007]. Para fritura a 120°C se generó una reducción en el contenido de acrilamida de 71,4%, a 150°C una reducción del 99,4% y a 180°C una reducción del 48,4%. Aunque las bajas temperaturas y tratamientos de escaldado e inmersión en soluciones antes del freído reduce drásticamente el contenido de acrilamida, los productos obtenidos presentaron una calidad sensorial no deseable.

La fermentación ácido láctica como lo plantea Friedman y Levin [2008] es otro tratamiento que puede aplicarse en papas antes del freído a través de la conversión de los azúcares reductores en ácido láctico por medio de la bacteria *Lactobacillus plantarum*, las cuales ocasionan un descenso del pH de 5,7 a 4, logrando una disminución entre el 48-71%. Con la

combinación de escaldado y fermentación se logró una disminución entre el 79-94% que al mismo tiempo también disminuye el pardeamiento del producto.

El uso de antioxidantes como medio para reducir el contenido de acrilamida ha sido estudiado por Zhang *et al.* [2007] quienes emplearon soluciones preparadas a partir de las hojas de bambú *Phyllostachys nigra var. henonis* que fueron secadas y pulverizadas, con dicho polvo se prepararon soluciones al 0.001%, 0.01%, 0.05%, 0.1%, 0.5%, y 1% en las cuales se sumergieron rodajas de papas crudas durante 60 segundos y obtuvieron una reducción del 74,1% de acrilamida en papas fritas como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 15. Efecto de las soluciones de bambú en los niveles de acrilamida en papas fritas**

De la anterior gráfica y de los resultados obtenidos por Zhang *et al.* [2007] se puede concluir que al sumergir las rodajas de papa cruda en soluciones de antioxidantes a partir de la extracción en hojas de bambú con una concentración de 0,1% se obtiene una reducción de acrilamida de 74,1% y de 76,1% en papas fritas y papas a la francesa respectivamente, además los atributos sensoriales no se ven alterados de manera significativa.

#### **7.4 ADICIÓN O SUSTITUCIÓN DE INGREDIENTES**

En productos de panadería o cereales los cuales son horneados, existen ingredientes y aditivos que disminuyen la formación de acrilamida. Amrein *et al.* [2004] encontraron que al usar bicarbonato de sodio en lugar de bicarbonato de amonio como agente leudante en el pan de jengibre reduce la concentración de acrilamida en 60%, ya que la sal de amonio mejora la formación de reactivos intermedios R-dicarbonilo, que cuando se combinan con amoniaco, forman iminas de azúcar que luego se transforman en acrilamida. En estos productos también se ha comprobado que al emplear sacarosa en lugar de miel o jarabes de azúcar invertido en el proceso de la elaboración se reduce el contenido de acrilamida en 25µg/kg debido a la falta de carbonilos reactivos, además que proporciona propiedades sensoriales aceptables en el

producto. Esto apoya estudios realizados por Gökmen *et al.* [2007] en galletas donde hubo una reducción en el contenido de acrilamida en aquellas que contenían sacarosa en comparación con las preparadas con glucosa. Estos resultados indican que la sustitución de los azúcares reductores (glucosa y fructosa) por sacarosa o azúcares no reductores pueden mitigar la formación de acrilamida.

Debido a que la asparagina libre determina en gran medida el contenido final de acrilamida, en productos como el pan de jengibre se han planteado estudios donde se busca su descomposición a través de la enzima asparaginasa, la cual hidroliza el grupo amida y convierte la asparagina en ácido aspártico. Los resultados mostraron una disminución del 55% en el contenido de acrilamida y con cualidades organolépticas similares al producto original [Amrein *et al.*, 2004], al igual que en estudios realizados por Zyzak *et al.* [2003] donde se reportó un tratamiento de papas con la enzima y se redujo el contenido de asparagina en 88% y de acrilamida en 99%, además el impacto en las propiedades sensoriales es mínimo pero la eficiencia de esta enzima se ve afectada por el contenido de agua, su dosificación, tiempo de contacto con el alimento, la temperatura y la permeabilidad en productos de granos enteros.

Investigaciones realizadas por Amrein *et al.* [2004] evaluaron el efecto de adicionar ácidos orgánicos y aminoácidos al pan de jengibre en los niveles de acrilamida y obtuvieron lo siguiente:

**Tabla 12. Efecto de la adición de ácidos orgánicos en el contenido de acrilamida**

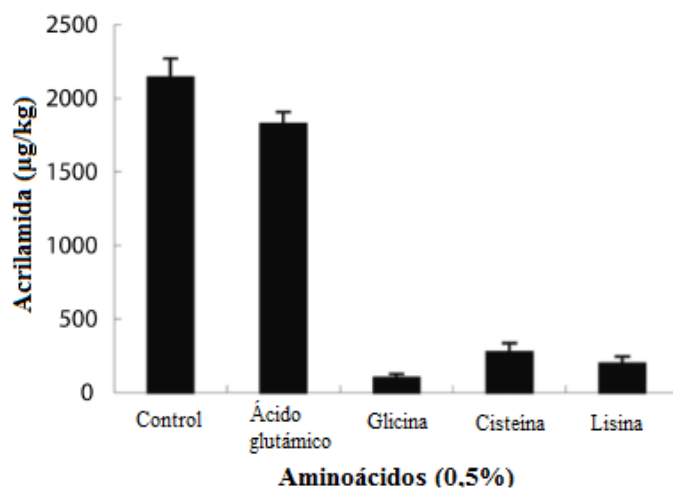
Ácido orgánico	Cantidad (mg/kg)	Acrilamida (µg/kg)	Valor L	pH
Sin adición	-	501	47,3	6,9
Ácido cítrico	5000	133	56,0	5,6
Ácido cítrico	10000	12	55,3	5,0
Glicina	2000	430	41,2	7,0
Glicina	10000	151	38,4	6,5
L- cisteína	500	368	48,7	6,7
L- cisteína	2000	380	42,7	6,4
L- glutamina	2000	587	41,9	6,8
L- lisina	2000	542	41,7	7,1

De acuerdo a los datos obtenidos se puede observar que al adicionar ácido cítrico, el contenido de acrilamida disminuyó significativamente pero al mismo tiempo el color café también disminuyó debido a la protonación del grupo amino de la asparagina lo cual dificulta la formación de N-glicosilamina. Sin embargo en los resultados obtenidos de la investigación, el pan presentó un ligero sabor ácido y su fermentación se vio afectada por la adición del ácido debido a una protonación forzada del amoniaco, por lo cual el volumen del gas se redujo. Al adicionar L-glutamina, L-lisina o glicina no se redujo el contenido de acrilamida pero si aumentó el pardeamiento del pan, debido a una mayor disponibilidad de

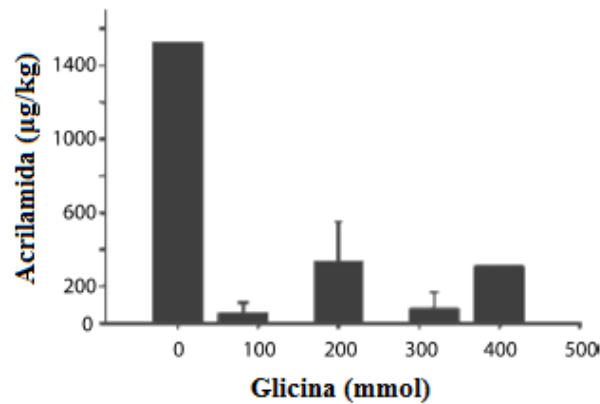
grupos aminos, los cuales generan más melanoidinas en la reacción de Maillard. Sin embargo al adicionar más glicina, la acrilamida disminuyó significativamente pero aumentó el pardeamiento, lo cual puede ocurrir debido a que la glicina es muy reactiva con los grupos carbonilos. Por otra parte, la L-cisteína mostró una tendencia a disminuir el contenido de acrilamida y el pH, del mismo modo. Jackson y Al-Taher [2005] reportó que al adicionar cisteína en papas se redujo 95% la acrilamida pero no es considerado un método práctico porque las características organolépticas de los productos no fueron aceptables [Amrein *et al.*, 2004]. Debido a que algunos aminoácidos ayudan a mejorar el pardeamiento al ser empleado en conjunto con otros métodos de mitigación de acrilamida que alteran el pardeamiento como la cocción a una temperatura más baja, se pueden crear productos aceptables para el consumidor y de alta calidad nutricional.

Estos resultados apoyan a los obtenidos por Rydberg *et al.* [2003] y Jung *et al.* [2003] quienes al emplear ácido cítrico (concentraciones menores al 2%) en papas fritas, papas horneadas, chips de maíz fritos y horneados presentaron una disminución cercana al 80% en el contenido de acrilamida. Rydberg *et al.* [2003] realizaron pruebas en papas en un horno de microondas a las cuales se les aplicó 8,3% de ácido ascórbico lo cual generó una reducción de acrilamida por encima del 90%. El ácido hace que descienda el pH y promueve la unión de agua que va a conducir a una inhibición parcial de la pirolisis que se refleja en un pardeamiento reducido. Estos tratamientos ácidos resultan ser eficaces en la prevención de acrilamida por descender el pH (<5) en un intervalo donde se minimiza su formación [Jung *et al.*, 2003].

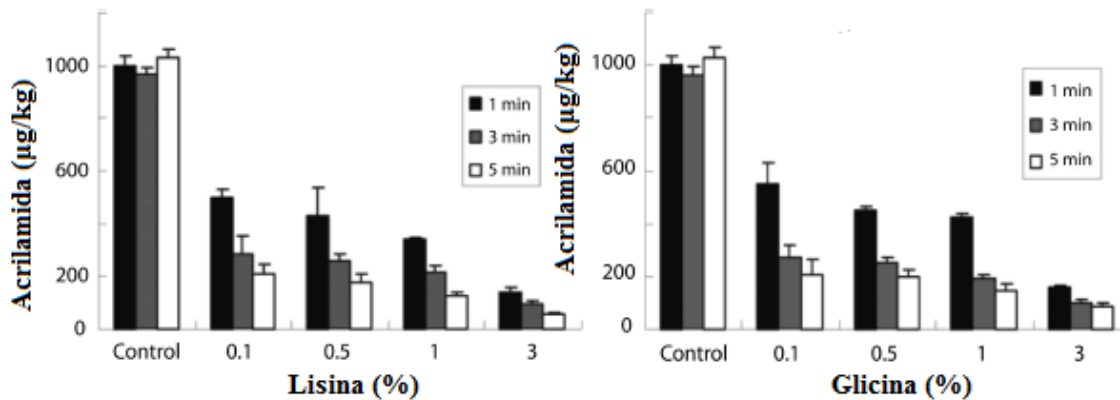
Estudios realizados por Friedman y Levin [2008] también han demostrado el efecto de adicionar aminoácidos como glicina, lisina, cisteína, entre otros en la disminución de acrilamida en sistemas de glucosa-asparagina, en papas fritas y panes, como se muestra en las siguientes figuras.



**Figura 16. Efecto de los aminoácidos sobre el contenido de acrilamida en un sistema glucosa-asparagina (150°C, 20 minutos)**



**Figura 17. Efecto de la glicina sobre la acrilamida en panes blandos**



**Figura 18. Efecto de la lisina y la glicina sobre el contenido de acrilamida en papas fritas**

Es evidente en las figuras anteriores que al adicionar aminoácidos en especial lisina y glicina en productos como panes y papas fritas se reducen las concentraciones de acrilamida, ya que compiten con la asparagina por el grupo carbonilo del azúcar y/o formar aductos con acrilamida después de formada. Resultados similares obtuvieron Kim *et al.* [2005] en los cuales la lisina y la glicina fueron eficaces para inhibir la formación de acrilamida en aperitivos hechos con harina de trigo y en papas fritas al adicionar 0,5% de glicina generó una reducción del 70%, y al remojar las rodajas crudas en una solución al 3% de glicina o lisina se obtuvo una reducción del 80% en el contenido de acrilamida después de ser freídas, por lo tanto la adición de ciertos aminoácidos o el remojo de los productos crudos en soluciones de aminoácidos es una alternativa que puede ser empleada para reducir de forma eficaz la acrilamida en alimentos procesados pero debe tenerse en cuenta las características organolépticas que se puedan afectar o las modificaciones del producto final que lleguen a ocurrir de acuerdo a la dosificación de aminoácido que se vaya a utilizar.



## 8 CONCLUSIONES

La acrilamida es un compuesto orgánico presente en los alimentos que son sometidos a tratamientos térmicos que involucran altas temperaturas como consecuencia de la reacción entre un aminoácido específico llamado asparagina y azúcares reductores de los alimentos ricos en estos precursores como lo son las papas fritas y horneadas, los cereales, productos de panadería y el café los cuales son los productos que mayores niveles de acrilamida presentan. En su formación existen diversos factores que afectan como lo son la temperatura, la humedad, el tiempo de tratamiento, tipo de azúcar reductor, pH, condiciones de cultivo, fertilización de suelos y almacenamiento de materias primas. Además debe considerarse también su estabilidad en los diferentes productos ya que a muy altas temperaturas se degrada o al almacenar productos por largo tiempo expuestos a la luz o al aire causa que como consecuencia de reacciones internas se vayan perdiendo cantidades de acrilamida.

Debido a la complejidad de las diversas matrices alimentarias no se ha estandarizado un método para la determinación de acrilamida en alimentos, lo cual es un tema que aún sigue bajo investigación y desarrollo para encontrar mediciones más acertadas y que no presenten mucha dispersión.

Aunque la acrilamida es carcinogénica en animales, las pruebas toxicológicas no son suficientes y concluyentes para indicar que la cantidad de acrilamida que se consume en la dieta normal resulta en efectos nefastos para la salud, en particular cáncer en humanos, por lo tanto no se presenta una legislación o un límite legal de contenido de acrilamida por alimento. Sin embargo estudios realizados por el comité mixto de Expertos en Aditivos Alimentarios (JECFA) han desarrollado manuales y guías que permiten que los países, industrias y entes controladores conozcan más sobre este compuesto y puedan mitigar los niveles de acrilamida a través de los controles de materias primas y de los procesos productivos. Lo cual es de gran importancia en la industria de los alimentos ya que se genera un apoyo por parte de entidades a través de estudios y guías que permitan controlar la cantidad de acrilamida que se pueda generar en la producción de alimentos y que pueda estar atentando con la salud de los consumidores y la seguridad alimentaria, además a pesar de que no haya regulación es un tema que compete a todo el mundo porque finalmente todos somos consumidores de estos alimentos inclusive desde la dieta del hogar.

La aplicación de calor es un proceso ampliamente usado en la industria de alimentos donde se destaca la cocción (horneado y freído) un método muy empleado en los alimentos que presentan mayores niveles de acrilamida y a través del manejo de parámetros propios del tratamiento como el control de temperatura y tiempo se genera grandes reducciones en los niveles de acrilamida. Existen alternativas que reducen grandes niveles de acrilamida entre las cuales se encuentran pre tratamientos, métodos como adición o sustitución de ingredientes como el uso de ácidos orgánicos, el cambio de los azúcares reductores, disminución de precursores como la asparagina o control de los procesos productivos (temperatura, tiempo) que de acuerdo a los estudios realizados y revisados son de gran ayuda en la mitigación de acrilamida en los alimentos transformados generando contenidos bajos de acrilamida en los productos finales, pero que deben ser estudiados y aplicados con ciertos

cuidados para no alterar las características organolépticas propias de los productos finales como el color, la textura, el olor y el sabor que son su atractivo y son las cualidades por las cuales los compradores prefieren su consumo.

Teniendo en cuenta todos los aspectos estudiados se deja como principal sugerencia en cada país con ayuda del estado continuar con investigaciones, estudios experimentales a nivel de laboratorio, pruebas piloto en plantas de fabricación de alimentos en especial aquellas que elaboran cereales, galletas, papas fritas, café, productos de panadería para ampliar los controles que se pueden aplicar a los productos que se someten a tratamientos térmicos con altas temperaturas y que son fuente principal de acrilamida, puesto que una ingesta elevada no es recomendable por sus efectos genotóxicos y carcinogénicos lo cual es un asunto que compete tanto a consumidores como productores de alimentos.

## 9 BIBLIOGRAFIA

ADEGOKE, G.O., ARNOLD, D., CANADY, R.A., CARERE, A., CARY, R., CASTLE, L., DIACHENKO, G.W., FARMER, P.B., FRIEDMAN, M.A., HELLENAS, K., HIROSE, M., KNAAP, A.G., LINGNERT, H., PETERSEN, B., SANNER, T., SCHLATTER, J., SCHWETZ, B.A., SHAHIDI, F., SPENCER, P.S., TORNQVIST, M. Y VERGER, P. Consecuencias para la Salud de Acrilamida en los Alimentos: Informe de la Consulta Conjunta de FAO/OMS. En. Suiza: Organización Mundial de la Salud, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación 2002, p. 35.

AHRNÉ, L., ANDERSSON, C.G., FLOBERG, P., ROSÉN, J. Y LINGNERT, H. Effect of crust temperature and water content on acrylamide formation during baking of white bread: Steam and falling temperature baking. *LWT - Food Science and Technology*, 12// 2007, vol. 40, no. 10, p. 1708-1715.

ALVES, R.C., OLIVEIRA, M.B.P.P. Y CASAL, S. Coffee authenticity. En: NETWORK. *Current Topics on Food Authentication*. 2011, p. 57-72.

ALVIS, A., CORTÉS, L.E. Y PÁEZ, M. Transferencia de calor y materia durante la fritura de trozos de ñame (*Dioscórca alata*). *Información Tecnológica*, 2009, vol. 20, no. 1, p. 99-109.

AMREIN, T.M., ANDRES, L., SCHÖNBÄCHLER, B., CONDE-PETIT, B., ESCHER, F. Y AMADÓ, R. Acrylamide in almond products. *European Food Research and Technology*, 2005/07/01 2005, vol. 221, no. 1-2, p. 14-18.

AMREIN, T.M., BACHMANN, S., NOTI, A., BIEDERMANN, M., BARBOSA, M.F., BIEDERMANN-BREM, S., GROB, K., KEISER, A., REALINI, P., ESCHER, F. Y AMADÓ, R. Potential of Acrylamide Formation, Sugars, and Free Asparagine in Potatoes: A Comparison of Cultivars and Farming Systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003/08/01 2003, vol. 51, no. 18, p. 5556-5560.

AMREIN, T.M., SCHÖNBÄCHLER, B., ESCHER, F. Y AMADÒ, R. Acrylamide in Gingerbread: Critical Factors for Formation and Possible Ways for Reduction. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004/06/01 2004, vol. 52, no. 13, p. 4282-4288.

BECALSKI, A., P. Y. LAU, B., LEWIS, D. Y SEAMAN, S.W. Acrylamide in Foods: Occurrence, Sources, and Modeling. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003/01/01 2003, vol. 51, no. 3, p. 802-808.

BIEDERMANN-BREM, S., NOTI, A., GROB, K., IMHOF, D., BAZZOCCO, D. Y PFEFFERLE, A. How much reducing sugar may potatoes contain to avoid excessive acrylamide formation during roasting and baking? *European Food Research and Technology*, 2003/11/01 2003, vol. 217, no. 5, p. 369-373.

BLANK, I., ROBERT, F., GOLDMANN, T., POLLIEN, P., VARGA, N., DEVAUD, S., SAUCY, F., HUYNH-BA, T. Y STADLER, R.H. Mechanisms of acrylamide formation: Maillard-induced transformation of asparagine. *Chemistry and Safety of Acrylamide in Food*, 2005, vol. 561, no. 1, p. 171-189.

CASTILLO, A. FDA lanza documento guía sobre Acrilamidas *Revista Industria y Alimentos*, 2014, vol. 1, no. 62, p. 8-11.

CLAUS, A., SCHREITER, P., WEBER, A., GRAEFF, S., HERRMANN, W., CLAUPEIN, W., SCHIEBER, A. Y CARLE, R. Influence of agronomic factors and extraction rate on the acrylamide contents in yeast-leavened breads. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Nov 15 2006, vol. 54, no. 23, p. 8968-8976.

CHAVARRÍAS, M. Nuevos datos sobre acrilamida. 2007. Disponible en: <http://www.consumer.es/seguridad-alimentaria/sociedad-y-consumo/2007/12/27/173228.php>.

DEARFIELD, K.L., ABERNATHY, C.O., OTTLEY, M.S., BRANTNER, J.H. Y HAYES, P.F. Acrylamide: its metabolism, developmental and reproductive effects, genotoxicity, and carcinogenicity. *Mutation Research/Reviews in Genetic Toxicology*, 1// 1988, vol. 195, no. 1, p. 45-77.

DERMIRKOL, E., ERDOGDU, F. Y KORAY, T. A numerical approach with variable temperature boundary conditions to determine the effective heat transfer coefficient values during baking cookies. *Journal of Food Process Engineering*, 2006, vol. 29, no. 5, p. 478-497.

DIAS, E.C. Efeito do processamento de frutos imaturos e da torração na ocorrência e na formação de compostos relevantes para a qualidade e segurança em café arábica. Tesis.: Universidad Federal de Lavras 2010. 130 p.

DUNOVSKÁ, L., HAJŠLOVÁ, J., CAJKA, T., HOLADOVÁ, K. Y HÁJKOVÁ, K. Changes of Acrylamide Levels in Food Products during Technological Processing. Czech Journal of Food Sciences, 2004, vol. 22, no. Edición especial p. 283-286.

EHLING, S. Y SHIBAMOTO, T. Correlation of acrylamide generation in thermally processed model systems of asparagine and glucose with color formation, amounts of pyrazines formed, and antioxidative properties of extracts. Journal of Agricultural and Food Chemistry, Jun 15 2005, vol. 53, no. 12, p. 4813-4819.

ELMORE, J.S., BRIDDON, A., DODSON, A.T., MUTTUCUMARU, N., HALFORD, N.G. Y MOTTRAM, D.S. Acrylamide in potato crisps prepared from 20 UK-grown varieties: Effects of variety and tuber storage time. Food Chemistry, 2015, vol. 182, no. 1, p. 1-8.

ERIKSSON, S. Acrylamide in Food Products: Identification, Formation and Analytical Methodology. Tesis. Stockholm, Sweden: Stockholm University, Department of Environmental Chemistry, 2005. 91 p.

FAO, F.A.A.O.O.T.U.N. Y WHO, W.H.O. *Prevention and Reduction of Food and Feed Contamination*. Roma: CODEX ALIMENTARIUS, 2012. 178 p.

FAYLE, S.E. Y GERRARD, J.A. *La reacción de Maillard*. 1 ed.: Editorial Acribia 2005.

FERNÁNDEZ, L. ¿Qué ocurre al cocinar los alimentos? ¿Cómo se forma la acrilamida? , 2008. Disponible en: <<http://www.eufic.org/article/es/artid/Que-ocurre-al-cocinar-los-alimentos-Como-se-forma-la-acrilamida/>>.

FILLION, L. Y HENRY, C. Nutrient losses and gains during frying: A review. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 1998, vol. 49, no. 2, p. 157-268.

FRANCO VELEZ, M., A. VILLEGAS, I.F., URIBE, J.A. Y BUSTOS, C. Nutrición y salud, el desafío para los snacks. En: *IALIMENTOS*. 2008.

FREDRIKSSON, H., TALLVING, J., ROSÉN, J. Y AMAN, P. Fermentation Reduces Free Asparagine in Dough and Acrylamide Content in Bread. Cereal Chemistry, 2004, vol. 81, no. 5, p. 650-653.

FRIEDMAN, M. Chemistry, Biochemistry, and Safety of Acrylamide. A Review. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003/07/01 2003, vol. 51, no. 16, p. 4504-4526.

FRIEDMAN, M. Y LEVIN, C.E. Review of methods for the reduction of dietary content and toxicity of acrylamide. Journal of Agricultural and Food Chemistry, Aug 13 2008, vol. 56, no. 15, p. 6113-6140.

GARCÍA, A. Y ALFARO, M.P. Acrilamida en alimentos para consumo humano. Revista de Sanidad Militar, 2007, vol. 61, no. 6.

GEANKOPLIS, C.J. *Procesos de transporte y principios de procesos de separación (incluye operaciones unitarias)*. 4 ed., 2006.

GERTZ, C., KLOSTERMANN, S. Y KOCHHAR, P. Deep frying: the role of water from food being fried and acrylamide formation. *Oléagineux Corps Gras Lipides*, 2003, vol. 10, no. 4, p. 297-303.

GIL, A. Y RUIZ, M.D. *Tratado de Nutrición: Composición y Calidad Nutritiva de los Alimentos*. 2 ed.: Editorial Medica Panamericana, 2010.

GÖKMEN, V., AÇAR, Ö.Ç., KÖKSEL, H. Y ACAR, J. Effects of dough formula and baking conditions on acrylamide and hydroxymethylfurfural formation in cookies. *Food Chemistry*, // 2007, vol. 104, no. 3, p. 1136-1142.

GOUADO, I., DEMASSE, M.A., ETAME, L.G., MEYIMBO, O., RUPHINE, S., EJOH, A. Y FOKUE, E. Impact of three cooking methods (steaming, roasting on charcoal and frying) on the  $\beta$ -carotene and vitamin C contents of plantain and sweet potato *American Journal of Food Technology* 2011, vol. 6, no. 11, p. 994-1001.

GRANBY, K. Y FAGT, S. Analysis of acrylamide in coffee and dietary exposure to acrylamide from coffee. *Analytica Chimica Acta*, 8/23/ 2004, vol. 520, no. 1-2, p. 177-182.

GRANDA, C., MOREIRA, R.G. Y TICHY, S.E. Reduction of Acrylamide Formation in Potato Chips by Low-temperature Vacuum Frying. *Journal of Food Science*, 2004, vol. 69, no. 8, p. 405-411.

GROB, K., BIEDERMANN, M., BIEDERMANN-BREM, S., NOTI, A., IMHOF, D., AMREIN, T., PFEFFERLE, A. Y BAZZOCCO, D. French fries with less than 100  $\mu\text{g}/\text{kg}$  acrylamide. A collaboration between cooks and analysts. *European Food Research and Technology*, 2003/09/01 2003, vol. 217, no. 3, p. 185-194.

GUENTHER, H., ANKLAM, E., WENZL, T. Y STADLER, R.H. Acrylamide in coffee: review of progress in analysis, formation and level reduction. *Food Addit Contam*, 2007, vol. 24 no. 1, p. 60-70.

GUTIÉRREZ, J.B. *Calidad de vida, alimentos y salud humana: Fundamentos científicos*. 1 ed.: Editorial Díaz de Santos, 2005. 408 p.

HOENICKE, K. Y GATERMANN, R. Studies on the stability of acrylamide in food during storage. *Journal of AOAC INTERNATIONAL*, Jan-Feb 2005, vol. 88, no. 1, p. 268-273.

ILLY, A. Y VIANI, R. *Espresso Coffee: The Science of Quality*. 2 ed.: Elsevier Academic, 2005.

ISHIHARA, K., MATSUNAGA, A., NAKAMURA, K., SAKUMA, K. Y KOGA, H. Examination of Conditions Inhibiting the Formation of Acrylamide in the Model System of Fried Potato. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2006/07/23 2006, vol. 70, no. 7, p. 1616-1621.

JACKSON, L.S. Y AL-TAHER, F. Effects of consumer food preparation on acrylamide formation. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 2005, vol. 561, p. 447-465.

JUNG, M.Y., CHOI, D.S. Y JU, J.W. A Novel Technique for Limitation of Acrylamide Formation in Fried and Baked Corn Chips and in French Fries. *Journal of Food Science*, 2003, vol. 68, no. 4, p. 1287-1290.

KIM, C.T., HWANG, E.S. Y LEE, H.J. Reducing Acrylamide in Fried Snack Products by Adding Amino Acids. *Journal of Food Science*, 2005, vol. 70, no. 5, p. 354-358.

LANTZ, I., TERNITE, R., WILKENS, J., HOENICKE, K., GUENTHER, H. Y VAN DER STEGEN, G.H. Studies on acrylamide levels in roasting, storage and brewing of coffee. *Molecular Nutrition & Food Research*, Nov 2006, vol. 50, no. 11, p. 1039-1046.

LINEBACK, D.R., COUGHLIN, J.R. Y STADLER, R.H. Acrylamide in foods: a review of the science and future considerations. *Annu Rev Food Sci Technol*, 2012, vol. 3, no. 1, p. 15-35.

LOPACHIN, R.M. Y LEHNING, E.J. Acrylamide-induced distal axon degeneration: a proposed mechanism of action. *Neurotoxicology*, 1994, vol. 15, no. 2, p. 247-259.

LOW, M.Y., KOUTSIDIS, G., PARKER, J.K., ELMORE, J.S., DODSON, A.T. Y MOTTRAM, D.S. Effect of Citric Acid and Glycine Addition on Acrylamide and Flavor in a Potato Model System. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2006, vol. 54, no. 16, p. 5976-5983.

LUCAS, J. Heat-Generated Food Toxicants; Identification, Characterisation and Risk Minimisation 2003, [Fecha de consulta: Marzo ]. Disponible en: <[http://www.slv.se/upload/heattox/documents/D62\\_final\\_project\\_leaflet.pdf](http://www.slv.se/upload/heattox/documents/D62_final_project_leaflet.pdf)>.

MASSON, L., REINALDO MUÑOZ, J., ROMERO, N., CAMILO, C., ENCINA, C., HERNÁNDEZ, L., ROBERT, P. Y CASTRO, J. Acrilamida en patatas fritas: Revisión actualizada. *Grasas y Aceites*, 2007, vol. 58, no. 2, p. 185-193.

MAZZAFERA, P. Chemical composition of defective coffee beans. *Food Chemistry*, 3// 1999, vol. 64, no. 4, p. 547-554.

MCGEE, H., MCINERNEY, J. Y HARRUS, A. The Virtual Cook: Modeling Heat Transfer in the Kitchen. *Physics Today* 1999, vol. 30, no. 5, p. 30-36.

MESTDAGH, F., CASTELEIN, P., VAN PETEGHEM, C. Y DE MEULENAER, B. Importance of Oil Degradation Components in the Formation of Acrylamide in Fried Foodstuffs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008/08/01 2008, vol. 56, no. 15, p. 6141-6144.

MISKIEWICZ, K., NEBESN, E. Y ORACZ, J. Formation of Acrylamide During Baking of Shortcrust Cookies Derived from Various Flours. *Czech Journal of Food Sciences* 2012, vol. 30, no. 1, p. 53-66.

MORALES, F., CAPUANO, E. Y FOGLIANO, V. Mitigation Strategies to Reduce Acrylamide Formation in Fried Potato Products. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2008, vol. 1126, no. 1, p. 89-100.

MORALES, F.J. Y MESIAS, M. Chapter 111 - Analysis of Acrylamide in Coffee. *En: PREEDY. Coffee in Health and Disease Prevention*. San Diego: Academic Press, 2015, p. 1013-1021.

MORENO, I.M., RUBIO, C., GUTIÉRREZ, A.J., CAMEÁN, A.M. Y HARDISSON DE LA TORRE, A. La acrilamida, contaminante químico de procesado: Revisión. *Revista de Toxicología*, 2007, vol. 24, no. 1, p. 1-9.

MOTTRAM, D.S., WEDZICHA, B.L. Y DODSON, A.T. Food chemistry: Acrylamide is formed in the Maillard reaction. *Nature*, 10/03/print 2002, vol. 419, no. 6906, p. 448-449.

MUSTAFA, A., ANDERSSON, R., HELLENAS, K.E., AMAN, P. Y KAMAL-ELDIN, A. Moisture enhances acrylamide reduction during storage in model studies of rye crispbread. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Dec 10 2008a, vol. 56, no. 23, p. 268-273.

MUSTAFA, A., KAMAL-ELDIN, A., PETERSSON, E.V., ANDERSSON, R. Y ÅMAN, P. Effect of extraction pH on acrylamide content in fresh and stored rye crisp bread. *Journal of Food Composition and Analysis*, 6// 2008b, vol. 21, no. 4, p. 351-355.

MUTTUCUMARU, N., POWERS, S.J., ELMORE, J.S., MOTTRAM, D.S. Y HALFORD, N.G. Effects of Nitrogen and Sulfur Fertilization on Free Amino Acids, Sugars, and Acrylamide-Forming Potential in Potato. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013/07/10 2013, vol. 61, no. 27, p. 6734-6742.

OLSSON, K., SVENSSON, R. Y ROSLUND, C.-A. Tuber components affecting acrylamide formation and colour in fried potato: variation by variety, year, storage temperature and storage time. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2004, vol. 84, no. 5, p. 447-458.

OMS, O.M.D.L.S. Y FAO, F.A.A.O.O.T.U.N. Acrilamida en los alimentos es un riesgo potencial para la salud INFOSAN, Red Internacional de Autoridades en materia de Inocuidad de los Alimentos 2005, vol. 1, no. 1, p. 1-5.

ORREGO, C.E. *Procesamiento de alimentos*. 1 ed.: Universidad Nacional de Colombia, 2003.

PARKASH KOCHHARA, S. Y GERTZ, C. New theoretical and practical aspects of the frying process. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2004, vol. 106, no. 11, p. 722-727.

PEDRESCHI, F., KAACK, K. Y GRANBY, K. Reduction of acrylamide formation in potato slices during frying. *LWT - Food Science and Technology*, 9// 2004, vol. 37, no. 6, p. 679-685.

PÉREZ, M.E. Y SOSA, M.E. Mecanismos de transferencia de calor que ocurren en tratamientos térmicos de alimentos *Temas selectos de Ingeniería de Alimentos* 2013, vol. 7, no. 1, p. 37-47.

RICHARDSON, P. *Tecnologías térmicas para el procesado de los alimentos* 1ed.: Editorial Acribia, 2004.

ROMERO, A., BASTIDA, S. Y SÁNCHEZ-MUNIZ, F.J. Cyclic fatty acid monomer formation in domestic frying of frozen foods in sunflower oil and high oleic acid sunflower oil without oil replenishment. *Food and Chemical Toxicology*, 10// 2006, vol. 44, no. 10, p. 1674-1681.

RYDBERG, P., ERIKSSON, S., TAREKE, E., KARLSSON, P., EHRENBERG, L. Y TÖRNQVIST, M. Investigations of Factors That Influence the Acrylamide Content of Heated Foodstuffs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003/11/01 2003, vol. 51, no. 24, p. 7012-7018.

SOARES, C.M.D., ALVES, R.C. Y OLIVEIRA, M.B.P.P. Acrylamide in Coffee: Influence of Processing. *En: PREEDY. Processing and Impact on Active Components in Food*. San Diego: Academic Press, 2015, p. 575-582.

SPIVEY, A. Cuestión de grados: para fomentar nuestra comprensión de la acrilamida. *Salud Pública de México*, 2010, vol. 52, p. 364-372.

STADLER, R.H., BLANK, I., VARGA, N., ROBERT, F., HAU, J., GUY, P.A., ROBERT, M.C. Y RIEDIKER, S. Food chemistry: Acrylamide from Maillard reaction products. *Nature*, 10/03/print 2002, vol. 419, no. 6906, p. 449-450.

STADLER, R.H., ROBERT, F., RIEDIKER, S., VARGA, N., DAVIDEK, T., DEVAUD, S., GOLDMANN, T., HAU, J. Y BLANK, I. In-Depth Mechanistic Study on the Formation of Acrylamide and Other Vinylogous Compounds by the Maillard Reaction. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004/08/01 2004, vol. 52, no. 17, p. 5550-5558.



STADLER, R.H. Y SCHOLZ, G. Acrylamide: An Update on Current Knowledge in Analysis, Levels in Food, Mechanisms of Formation, and Potential Strategies of Control. *Nutrition Reviews*, 2004, vol. 62, no. 12, p. 449-467.

SUÁREZ, P., RODRÍGUEZ, E.M. Y DÍAZ ROMERO, C. Cambios en el valor nutritivo de patatas durante distintos tratamientos culinarios *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 2004, vol. 4, no. 4, p. 257-261.

SURDYK, N., ROSÉN, J., ANDERSSON, R. Y ÅMAN, P. Effects of Asparagine, Fructose, and Baking Conditions on Acrylamide Content in Yeast-Leavened Wheat Bread. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004/04/01 2004, vol. 52, no. 7, p. 2047-2051.

TAEYMANS, D., WOOD, J., ASHBY, P., BLANK, I., STUDER, A., STADLER, R.H., GONDE, P., VAN EIJCK, P., LALLJIE, S., LINGNERT, H., LINDBLOM, M., MATISSEK, R., MULLER, D., TALLMADGE, D., O'BRIEN, J., THOMPSON, S., SILVANI, D. Y WHITMORE, T. A Review of Acrylamide: An Industry Perspective on Research, Analysis, Formation, and Control. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2004/09/01 2004, vol. 44, no. 5, p. 323-347.

TAREKE, E., RYDBERG, P., KARLSSON, P., ERIKSSON, S. Y TORNQVIST, M. Analysis of acrylamide, a carcinogen formed in heated foodstuffs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* Aug 14 2002, vol. 50, no. 17, p. 4998-5006.

TAUBERT, D., HARLFINGER, S., HENKES, L., BERKELS, R. Y SCHÖMIG, E. Influence of Processing Parameters on Acrylamide Formation during Frying of Potatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004/05/01 2004, vol. 52, no. 9, p. 2735-2739.

TIRADO ARMESTO, D., ACEVEDO CORREA, D. Y ENRIQUE GUZMAN, L. Freído por inmersión de los alimentos. *En: Revista ReCiTeIA*. 2012, vol. 12, p. 72-80.

VALENZUELA, R. Y RONCO, A.M. Acrilamida en los alimentos. *Revista chilena de nutrición*, 2007, vol. 34, p. 8-16.

YAYLAYAN, V.A., PEREZ, C., WNOROWSKI, A. Y O'BRIEN, J. Mechanistic Pathways of Formation of Acrylamide from Different Amino Acids. *En: FRIEDMAN Y MOTTRAM. Chemistry and Safety of Acrylamide in Food*. Springer US, 2005, vol. 561, p. 191-203.

YAYLAYAN, V.A. Y STADLER, R.H. Acrylamide formation in food: a mechanistic perspective. *Journal of AOAC International* Jan-Feb 2005, vol. 88, no. 1, p. 262-267.

YAYLAYAN, V.A., WNOROWSKI, A. Y PEREZ LOCAS, C. Why asparagine needs carbohydrates to generate acrylamide. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Mar 12 2003, vol. 51, no. 6, p. 1753-1757.

YILDIZ, A., KORAY PALAZOĞLU, T. Y ERDOĞDU, F. Determination of heat and mass transfer parameters during frying of potato slices. *Journal of Food Engineering*, 3// 2007, vol. 79, no. 1, p. 11-17.

ZHANG, Y., CHEN, J., ZHANG, X., WU, X. Y ZHANG, Y. Addition of Antioxidant of Bamboo Leaves (AOB) Effectively Reduces Acrylamide Formation in Potato Crisps and French Fries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007/01/01 2007, vol. 55, no. 2, p. 523-528.

ZUBELDIA, L. Y GOMAR, J. Acrilamida en patatas fritas y productos de aperitivo elaborados en la Comunidad Valenciana. *Gaceta Sanitaria*, 2007, vol. 21, no. 4, p. 334-337.

ZYZAK, D.V., SANDERS, R.A., STOJANOVIC, M., TALLMADGE, D.H., EBERHART, B.L., EWALD, D.K., GRUBER, D.C., MORSCH, T.R., STROTHERS, M.A., RIZZI, G.P. Y VILLAGRAN, M.D. Acrylamide Formation Mechanism in Heated Foods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003/07/01 2003, vol. 51, no. 16, p. 4782-4787.