

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS

ESCUELA DE POSTGRADO

**REDUCCION DEL CONTENIDO DE ACRILAMIDA EN HOJUELAS DE PAPAS
FRITAS POR APLICACION DE PRETRATAMIENTOS Y DIFERENTES
TEMPERATURAS DE FRITURA**

JOSE REINALDO MUÑOZ QUINTERO
INGENIERO AGROINDUSTRIAL

SANTIAGO – CHILE
2007

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS

ESCUELA DE POSTGRADO

**REDUCCION DEL CONTENIDO DE ACRILAMIDA EN HOJUELAS DE PAPAS
FRITAS POR APLICACION DE PRETRATAMIENTOS Y DIFERENTES
TEMPERATURAS DE FRITURA**

Tesis presentada como parte de los requisitos
para optar al grado de Magíster en Ciencias
Agropecuarias Mención Producción
Agroindustrial.

JOSE REINALDO MUÑOZ QUINTERO
INGENIERO AGROINDUSTRIAL

SANTIAGO – CHILE
2007

**REDUCCION DEL CONTENIDO DE ACRILAMIDA EN HOJUELAS DE PAPAS
FRITAS POR APLICACION DE PRETRATAMIENTOS Y DIFERENTES
TEMPERATURAS DE FRITURA**

PROFESORES GUIAS

Prof. Lilia Masson Salaue
Químico Farmacéutico Aprobado

Prof. MSc. Nalda Romero Palacios
Químico Farmacéutico Aprobado

PROFESORES CONSEJEROS

Prof. Dr. Marco Schwartz Melgar
Químico Aprobado

Prof. Mg. Sc. Maria de la Luz Hurtado
Ingeniero agrónomo Aprobado

*A todos aquellos, que en la distancia, siempre
estuvieron presentes. Mamá, abuela,
hermanos, familia. JDa*

AGRADECIMIENTOS

A la Agencia de Cooperación Internacional de Chile - AGCI, por otorgarme la beca que permitió llevar a cabo mis estudios de magíster.

A la Universidad de Chile y sus Facultades de Agronomía y Química y Farmacia.

A la Profesora Lilia Masson y demás orientadores de este gran proyecto académico ... mi maestría!

A los y las colegas con los que compartí inolvidables momentos.

Y por supuesto... a Dios, a mi familia y en nombre de mi país, a todos aquellos, que estando aquí o allá, han seguido paso a paso mi fortalecimiento personal.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN GENERAL	1
SUMMARY	3
INTRODUCCION	5
REVISION BIBLIOGRAFICA	9
¿Qué es la acrilamida?	9
Formación de acrilamida en alimentos	9
Factores que afectan la formación de acrilamida en papas fritas.....	12
Tipo de Aceite Empleado en la Fritura	12
Presencia de Precursores, Humedad, Temperatura y Tiempo de Fritura.....	12
Endulzamiento a Bajas Temperaturas (<i>Low – Temperature Sweetening</i>)	15
Pretratamientos de Lavado, Escaldado, Inmersión y Acidificación	16
MATERIALES Y METODOS	21
Materiales.....	21
Lugar de Trabajo.....	21
Materia Prima.....	21
Materiales para determinación de acrilamida	22
Método	22
Determinaciones Analíticas	22
Determinación de Acrilamida	24
Análisis Sensorial.....	24
Diseño Experimental.....	25
Descripción del Proceso de Elaboración de las Hojuelas de Papas Fritas	27
RESULTADOS Y DISCUSION	29
Caracterización de la Materia Prima.....	29
Rol del agua en la formación de acrilamida.....	31
Relación Temperatura de Fritura – Tiempo de Fritura	38
Rendimiento del Proceso de Elaboración de Hojuelas de Papa Fritas.....	40

Análisis del Contenido de Acrilamida y su Relación con los Precursores Presentes	41
Análisis estadístico del diseño	44
Evaluación Sensorial.....	45
Método descriptivo para evaluación de la calidad de hojuelas de papas fritas.....	45
Diferencias entre tratamientos en función del lote de fritura.....	52
Análisis sensorial de aceptabilidad de hojuelas de papas fritas	53
CONCLUSIONES	56
LITERATURA CITADA	57
ANEXOS	66

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Matriz del diseño experimental	26
Cuadro 2. Caracterización química de las papas del lote 1 en diferentes etapas de proceso (Base seca, BS)	29
Cuadro 3. Caracterización química de las papas del lote 2 en diferentes etapas de proceso (Base seca, BS)	33
Cuadro 4. Caracterización química de las hojuelas de papas fritas (BS)	35
Cuadro 5. Contenido de acrilamida en los diferentes tratamientos (BS)	41
Cuadro 6. Análisis de varianza – Tipo III para contenido de acrilamida	44
Cuadro 7. Test de comparación múltiple de Tukey para hojuelas de papas fritas	45
Cuadro 8. <i>p – value</i> de la interacción Lote – Tratamiento para cada atributo de calidad	52
Cuadro 9. Análisis de varianza para aceptabilidad de hojuelas de papas fritas	53
Cuadro 10. Test de comparación múltiple de Tukey para aceptabilidad de hojuelas de papas fritas	53

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metabolismo de la acrilamida a glicidamida	6
Figura 2. Rutas de formación de acrilamida	11
Figura 3. Diagrama de flujo de proceso de elaboración de hojuelas de papas fritas	26
Figura 4. Esquema del sistema de fritura	28
Figura 5: Proceso de elaboración de hojuelas de papas fritas	28
Figura 6. Valores de pH y Aw en los diferentes tratamientos de hojuelas de papas fritas	35
Figura 7. Porcentajes de reducción de asparragina durante la fritura de los diferentes tratamientos y su relación con el pH	37
Figura 8. Relación Temperatura de fritura (°C) – Tiempo de fritura (s), de los tratamientos evaluados	38
Figura 9. Rendimientos del proceso para cada unos de los tratamientos aplicados	40
Figura 10. Contenido de acrilamida (ppb) de los tratamientos analizados	41
Figura 11. Relación entre la reducción de asparragina y la formación de acrilamida	43
Figura 12. Comportamiento de los parámetros de Color (A) y Pardeamiento (B) en la evaluación de calidad de hojuelas de papas fritas	47
Figura 13. Comportamiento del parámetro de Transparencia en la evaluación de calidad de hojuelas de papas fritas	49
Figura 14. Comportamiento del parámetro de Dureza en la evaluación de calidad de hojuelas de papas fritas.....	50
Figura 15. Comportamiento del parámetro de Presencia de Sabor Extraño en la evaluación de calidad de hojuelas de papas fritas	51
Figura 16. Promedios de aceptabilidad de hojuelas de papas fritas	54
Figura 17. Porcentajes de aceptabilidad de hojuelas de papas fritas	54

RESUMEN GENERAL

Se estudió la influencia de los pretratamientos de escaldado y acidificación a través de inmersión en solución de ácido cítrico y el efecto de la temperatura de fritura a presión atmosférica sobre el contenido de acrilamida en hojuelas de papas fritas, elaboradas a partir de papas de la variedad Panda.

La aplicación de los pretratamientos influyó significativamente en la reducción del contenido de acrilamida en las hojuelas de papas fritas. La solución de ácido cítrico aparentemente no afectó el contenido de azúcares totales y libres significativamente. Su aplicación con fines de reducción de azúcares no es vital, pero si se desea reducir el contenido de asparragina, constituye el pretratamiento más efectivo (la reducción obtenida fue del orden del 52%). Tanto el escaldado como la inmersión en solución de ácido cítrico, son pretratamientos complementarios. El contenido de asparragina en las hojuelas de papas fritas pretratadas (T), comparado con el obtenido después de someterlas en la solución de ácido cítrico mostró una reducción de 78%, 89% y 92%, para los tratamientos 150T, 160T y 170T, respectivamente; mientras que, al comparar su contenido final (después de fritura) en los tratamientos control (C) con su contenido en las papas después del prelavado, las reducciones fueron de 76%, 71% y 80%, para 150C, 160C y 170C, respectivamente. El consumo de asparragina en la reacción de Maillard aumentó al incrementarse la temperatura de fritura, por lo que la temperatura de fritura fue el factor físico más importante en la formación de acrilamida. La acrilamida se redujo en 84 veces al comparar los tratamientos 150T lote 2 y 150C lote 2, lo que se tradujo en la efectividad de los pretratamientos, además del efecto de la temperatura de fritura y la alta humedad presente en la muestra. Entre los tratamientos 160T y 160C del lote 1, hubo un 84% de reducción del contenido de acrilamida y entre el 160T y 160C del lote 2, la reducción fue del orden del 99,5%. Se obtuvieron reducciones de 94% y 97%, entre los tratamientos 170T lote 1 y 2 y entre 170C lote 1 y 2, respectivamente, lo que indicó la efectividad considerable de los pretratamientos sobre los precursores de la acrilamida, a esta temperatura crítica de

formación. Según la optimización del modelo estadístico, al freír hojuelas de papas a una temperatura de 165°C, bajo las mismas condiciones de tiempo de fritura, aceite y partiendo de hojuelas previamente sometidas a prelavado con agua destilada por un minuto, seguido de escaldado en agua destilada a 90°C por un minuto y finalmente inmersión en una solución de ácido cítrico 0,25% por una hora, se espera un contenido de acrilamida de 2,26 $\mu\text{g kg}^{-1}$. Sensorialmente, en el atributo pardeamiento, se evidenció cierta diferencia significativa ($\alpha < 0,05$) entre los tratamientos. El tratamiento mejor aceptado por los consumidores fue el 170C, mientras que el 150T fue el peor evaluado. Los pretratamientos de escaldado y acidificación afectaron los atributos considerados principales en cualquier evaluación sensorial de un producto alimenticio, como lo son, la apariencia, sabor y textura.

Palabras claves: acrilamida – papas – fritura a presión atmosférica – pretratamientos.

SUMMARY

Studied the influence of the blanching and acidification through immersion of citric acid solution and the effect of frying on the acrylamide content in potatoes chips, elaborated from Potatoes of the variety Panda.

The application of the previous pre treatments, influenced significantly in the reduction of the acrylamide content in potatoes chips. The citric acid solution apparently did not affect the total and free sugar content significantly.

Its application with aims of sugar reduction is not vital, but it is desired to reduce the asparagine content, constitutes the most effective pre treatments (obtained reduction was of the order of 52%). Blanching and immersion in citric acid solution, is complementary pre treatments, and nonsubstitutes.

The content of asparagine in potatoes chips pretreated, compared with the obtained one after putting under them in the citric acid solution showed a reduction of 78%, 89% and 92%, for the treatments 150T, 160T and 170T, respectively; whereas, when comparing their final content in the treatments control with their content in the Potatoes after the pre washing, the reductions were of 76%, 71% and 80%, for 150C, 160C and 170C, respectively.

The consumption of asparagine in the reaction of Maillard increased when being increased the temperature of frying, reason why the temperature of frying was the more important physical factor in the acrylamide formation.

Acrylamide was reduced in 84 times between the treatments 150T lot 2 and 150C lot 2, which was translated in the effectiveness of the pre treatments, in addition, the effect of frying and the high present humidity in the sample.

Between the treatments 160T and 160C of lot 1, were 84% of reduction of the acrylamide content of and between 160T and 160C of lot 2, the reduction was of the order of 99.5%. Reductions of 94% and 97% were obtained, between the treatments 170T lot 1 and 2 and between 170C lot 1 and 2, respectively, which indicated the considerable effectiveness of the pre treatments on the precursors of the acrylamide, to this critical temperature of formation.

According to the optimization of the statistical model, when frying potatoes chips to 165°C, under the same conditions of time of frying, oil and starting off of chips previously put under pre washing with water distilled by a minute, followed of blanching in distilled water 90°C by a minute and finally immersion in a citric acid solution 0.25% by one hour, is expected a 2,26 µg kg⁻¹ of acrylamide.

Sensorially, in the darkness attribute, certain significant difference ($\alpha < 0.05$) between the treatments was demonstrated. The treatment better accepted by the consumers was 170C, whereas 150T was the worse evaluated. Blanching and acidification affected the attributes considered main in any sensorial evaluation of a food, as it they are, the appearance, flavor and texture.

Key words: acrylamide, potatoes, atmospheric pressure frying, pre treatments

INTRODUCCION

La acrilamida, una sustancia química simple, ha entrado a formar parte del grupo de agentes tóxicos que se forman durante el procesamiento térmico de alimentos ricos en almidón y ello supone un peligro en su condición de ser perjudicial para la salud pública.

El hallazgo de elevadas cantidades de acrilamida (partes por billón, ppb) en diferentes alimentos de consumo habitual, sometidos previamente a tratamientos térmicos para su preparación, fue anunciada conjuntamente por investigadores de la Universidad de Estocolmo y de la Administración Nacional de Alimentos de Suecia, en conferencia de prensa el 24 de abril del 2002. Al mismo tiempo, datos analíticos de varios alimentos fueron puestos a disposición del público en el sitio *Web* de la Administración (Rosén y Hellenäs, 2002).

Los resultados de las investigaciones suecas se confirmaron con rapidez por distintas agencias estatales de alimentos, creándose un Comité Científico que deliberó sobre el riesgo potencial de la acrilamida para la salud. Con posterioridad, todos los datos disponibles fueron difundidos por los grupos de expertos de organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (WHO), la Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), el Instituto Común para la Seguridad Alimentaria y Nutrición Aplicada/Centro Nacional para la Seguridad y la Tecnología Alimentaria (JIFSAN/NCFST) (JIFSAN/NCFST, 2002).

Estos grupos han identificado y catalogado las investigaciones y sus prioridades para definir los riesgos potenciales a la salud asociados a este inesperado hallazgo.

El descubrimiento de la acrilamida se origina a partir de resultados de la formación de un aducto específico con la hemoglobina en humanos, más adelante también encontrada por los científicos de la Universidad de Estocolmo en ratas alimentadas con alimentos fritos (Tareke *et al.*, 2000).

La acrilamida se ha clasificado como “probable carcinogénico para humanos” (Grupo 2A) por la Agencia Internacional de Investigación sobre Cáncer - IARC (IARC, 1994). La exposición a la acrilamida causa daño al sistema nervioso en seres humanos y animales (Lopachin y Lehning, 1994; Tilson, 1981) y también se considera una toxina antireproductiva (Costa *et al.*, 1992; Dearfield *et al.*, 1988) con características mutágenicas y carcinogénicas en sistemas experimentales *in-vitro* e *in-vivo* (Dearfield *et al.*, 1995). Evidencias de ensayos experimentales en laboratorios mostraron que la acrilamida y su principal metabolito, la glicidamida (Figura 1), son genotóxicos y carcinogénicos *in vitro* e *in vivo* en altos niveles. En estudios celulares, estos dos compuestos indujeron un quiebre cromosomal y puntos de mutación (Rice, 2005).

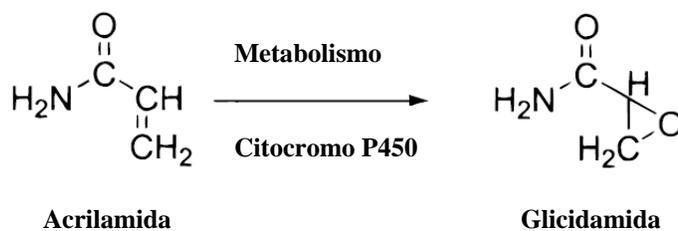


Figura 1. Metabolismo de la acrilamida a glicidamida.

Se han reportado niveles de acrilamida en alimentos del orden de partes por millón (ppm, mg kg⁻¹). Como simple comparación, la organización Mundial de la Salud limita el contenido de acrilamida en agua potable para beber en 0,5 µg kg⁻¹ (partes por billón) para muchos países (WHO, 1985, 1996) y en Europa, la recomendación se fijó en 0,1 µg kg⁻¹ a partir del 2003 (EEC, 1998).

En la Unión Europea, en el sector alimenticio, los límites de acrilamida existentes debido a que la migración del plástico de los envases hacia el alimento, no deben ser perceptibles en cantidades mayores de $10 \mu\text{g kg}^{-1}$ (EEC, 1992).

Tomando como consideración que la acrilamida es un cancerígeno demostrado en roedores, actúa como neurotóxico en humanos y es clasificado como posible cancerígeno en humanos, y a pesar que estudios preliminares indican la ausencia de un vínculo sustancial entre la acrilamida y el cáncer en humanos (Pelucchi *et al.*, 2003 y Mucci *et al.*, 2003), hay una urgente necesidad de investigar las posibilidades para reducir el contenido de acrilamida en alimentos.

Enfoques tan importantes como la validación de una metodología definida de análisis, pasando por complejos estudios tanto de biodisponibilidad como epidemiológicos, deben ser resueltos en los próximos años. Es por ello, que se deben fortalecer los proyectos conducentes a la investigación de estos compuestos presentes en los alimentos consumidos habitualmente en nuestra dieta diaria, tales como hojuelas de papas fritas, papas fritas en bastones, pan, galletas, cereales para el desayuno, café, productos *snacks*, entre otros.

El grupo de trabajo del Centro de Investigación y Desarrollo en Grasas y Aceites, CIDGRA, del Departamento de Ciencia de los Alimentos y Tecnología Química, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas, en el marco del proyecto internacional *UE HEATOX* N° 506820, participa en la línea de investigación que tiene por objetivo introducir modificaciones al proceso de fritura de hojuelas de papas, para reducir al mínimo las cantidades de acrilamida y obtener alimentos más seguros, nutritivos y de calidad. Adicionalmente, implementar y desarrollar la metodología analítica para determinar acrilamida en hojuelas de papas fritas, que emplea cromatografía líquida y espectrometría de masas.

La presente investigación se considera como parte de los objetivos planteados en el proyecto *HEATOX*, desarrollado en la Universidad de Chile. Los objetivos de esta tesis son

determinar si la aplicación de pretratamientos a las hojuelas de papas crudas que incluyen control de pH, reducen significativamente el contenido de acrilamida en las hojuelas de papas fritas; determinar si las temperaturas de fritura posterior a los pretratamientos influyen en la formación de acrilamida y evaluar sensorialmente las hojuelas de papas fritas obtenidas de los diferentes tratamientos.

Se pretende demostrar que la aplicación de pretratamientos de escaldado y acidificación, así como la variación en la temperatura de fritura en sus diferentes niveles empleados, influyen significativamente en la reducción del contenido de acrilamida en hojuelas de papas fritas.

REVISION BIBLIOGRAFICA

¿Qué es la acrilamida?

La acrilamida (2-propenamida) es un sólido cristalino, incoloro e inodoro, con un punto de fusión de 84,5°C. Presenta solubilidad (g/100 mL a 30°C) de 215,5 en agua; 155 en metanol; 86,2 en etanol y 63,1 en acetona. Tiene alta movilidad en el suelo y el agua subterránea. Se considera como biodegradable (Smith *et al.*, 1996, 1997).

La acrilamida es un monómero sintético con un amplio espectro de aplicación industrial, principalmente como precursor en la fabricación de diferentes polímeros, como la poliacrilamida. El principal uso de la poliacrilamida está en el tratamiento de aguas potables no residuales, cosmética, procesamiento de pulpa y papel, minería y procesamiento de minerales (Taeymans *et al.*, 2004).

Formación de acrilamida en alimentos

En la actualidad, se dispone de amplia información sobre la formación de la acrilamida en los alimentos. Parece ser que se produce de forma natural en algunos alimentos que son sometidos a cocción o procesamiento a altas temperaturas y los niveles parecen incrementarse con la duración del calentamiento.

Los mayores niveles encontrados hasta ahora (del orden de $\mu\text{g g}^{-1}$) están en alimentos amiláceos (papas y cereales). Investigaciones en curso tratan de explicar con mayor claridad porqué se forma la acrilamida y las condiciones que promueven o reducen su presencia en los alimentos.

La situación se complica por el hecho que la acrilamida es una sustancia reactiva y volátil que puede reaccionar y autodegradarse después de su formación (Godnic, 2002).

Recientemente, los investigadores han focalizado sus estudios sobre los posibles mecanismos de formación en los alimentos (Zyzak *et al.*, 2003). Algunos grupos han confirmado que la mejor vía de síntesis es la reacción de Maillard entre aminoácidos y azúcares reductores, (Mottram *et al.*, 2002; Coughlin, 2003), siendo la asparragina, 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).

El calentamiento de cantidades equimolares de asparragina y glucosa a 180°C por 30 minutos produjeron 368 μmol de acrilamida por mol de asparragina (Stadler *et al.*, 2002). La formación es termodependiente hasta 170°C, iniciándose a temperaturas más elevadas un proceso de autodegradación aún poco explicado. Otros aminoácidos que producen bajas cantidades de acrilamida son alanina, arginina, ácido aspártico, cisteína, glutamina, metionina, treonina y valina.

En la Figura 2 se presentan esquemáticamente algunas de las rutas de formación de acrilamida según Taeymans *et al.* (2004), los que plantearon la formación inicial de *N*-(D-glucos-1-il)-L asparragina (I), 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, sigue la vía (D) que termina en 1-amino-1-deoxicetosa de asparragina, conocido como el compuesto de Amadori (VII), el cual representa el primer intermediario estable generado en un sistema acuoso. La base de Schiff puede experimentar una ciclación intramolecular (paso B) resultando la oxazolidina-5-1-derivado (III), si este último compuesto se decarboxila, se obtiene el compuesto de Amadori decarboxilado (IV), el que puede sufrir 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 asparragina (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.

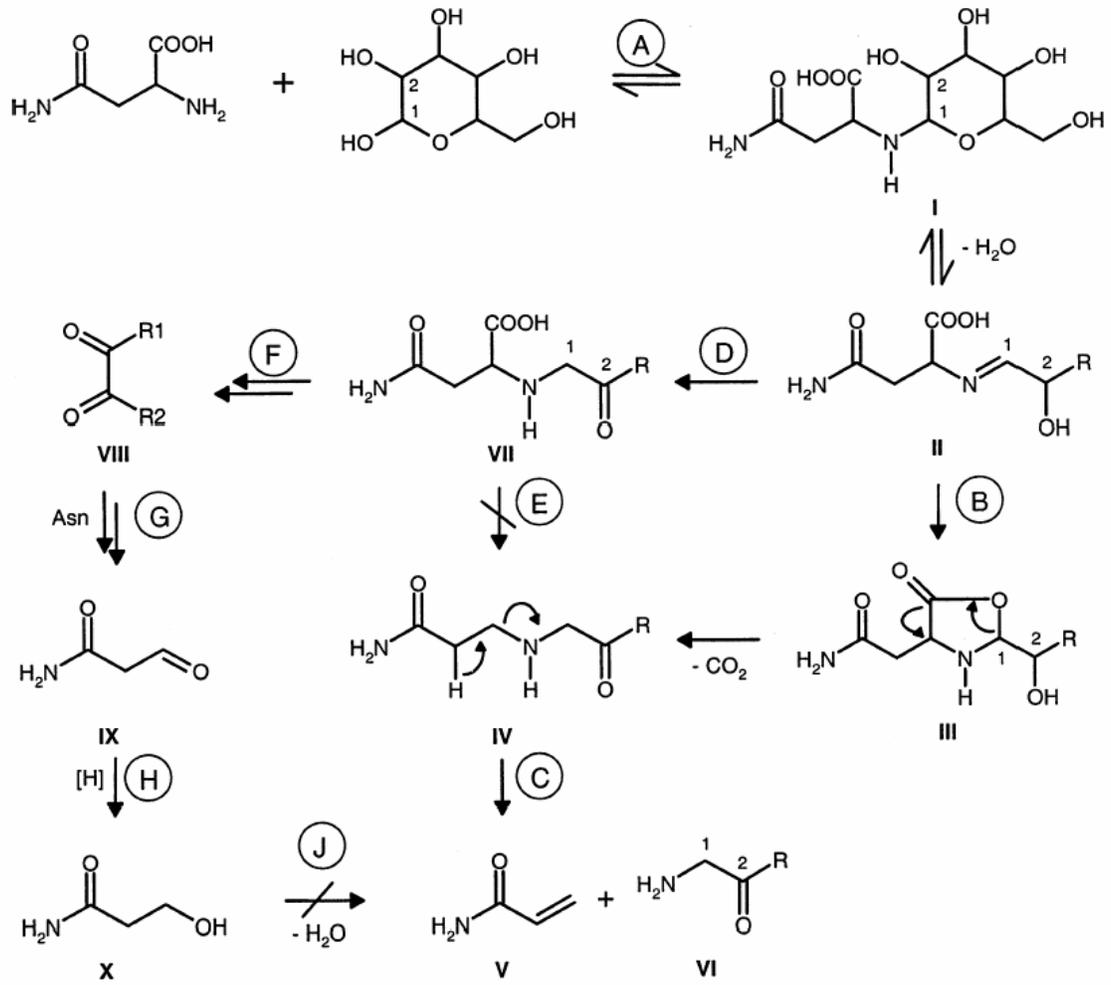


Figura 2. Rutas de formación de acrilamida.

Corradini y Peleg (2006) describieron con gran detalle la cinética de la síntesis y degradación de acrilamida en alimentos y en sistemas modelos. De la misma manera, Stadler *et al.* (2004) presentaron una minuciosa descripción de la formación de acrilamida y de otros compuestos producidos en la reacción de Maillard.

No se encuentra acrilamida en alimentos que no han sido sometidos a tratamientos térmicos o que solo se han hervido. Sin embargo, Ezeji *et al.* (2003) descubrieron su formación durante la cocción del almidón en autoclave.

Otros resultados indican que cuando la asparragina reacciona con el glicerol, se forma acrilamida en un nivel de $4,42 \mu\text{g g}^{-1}$ de asparragina, pero no sucede lo mismo cuando este aminoácido reacciona con etilenglicol. El resultado sugiere que la formación de acrilamida se acelera por el grupo carbonilo y que se necesita de una molécula de tres carbonos, como el glicerol, para la formación (Yasuhara *et al.*, 2003).

Factores que afectan la formación de acrilamida en papas fritas

Los factores más importantes que determinan la cinética de formación de acrilamida y su posterior degradación son la composición de la papa y las variables de proceso. La papa aporta los precursores de la acrilamida en una concentración dependiente de su variedad, de las condiciones del suelo, del periodo de cosecha y de las condiciones de almacenamiento postcosecha (Low *et al.*, 2006). Las variables de proceso fundamentales son la temperatura del aceite, el tiempo de fritura y ciertas propiedades de la papa como pH, actividad de agua, capilaridad y porosidad (Surdyk *et al.*, 2004; Gertz *et al.*, 2003).

Tipo de Aceite Empleado en la Fritura

El tipo de aceite y su estado de oxidación e hidrólisis en glicerol, mono- y diacilglicerol, no influyeron significativamente en el contenido final de acrilamida (Gertz *et al.*, 2003; Mestdagh *et al.* 2007). Sin embargo, debido a la hidrólisis del aceite, elevados contenidos de glicéridos parciales de carácter anfifílico, pueden modificar la tensión superficial entre el agua de la superficie del alimento y el aceite no polar, modificando la transferencia de calor del aceite al alimento en un periodo de tiempo fijo. (Gertz, 2004; Gertz y Klostermann, 2002; Gertz *et al.*, 2003).

Presencia de Precursores, Humedad, Temperatura y Tiempo de Fritura

Según Matthäus *et al.* (2004) y Pedreschi *et al.* (2005), la temperatura y el tiempo de fritura en profundidad son los factores iniciadores que más afectan la cantidad de acrilamida

formada en las papas. La cantidad final depende de la cantidad de precursores directos, asparragina y azúcares reductores, ya que las papas como materia prima, no contienen acrilamida (Olsson *et al.*, 2004; Williams, 2005).

Se considera que la asparragina es la fuente de nitrógeno para la formación de la acrilamida; el calentamiento de este aminoácido en estado puro, no produce acrilamida eficientemente, pero combinado con azúcares reductores como la glucosa o la fructosa, se acelera su formación. La asparragina presente en las papas, no se afecta por la conservación de éstas en ambientes a bajas temperaturas, menores a 10°C, antes de su procesamiento industrial (Olsson *et al.*, 2004).

La asparragina es el aminoácido libre presente en mayor cantidad en la papa, según Martin y Ames (2001), su contenido es de 93,9 mg/100g. Su contenido en las papas depende de diferentes factores, entre ellos la variedad de la papa, localización del cultivo, prácticas de fertilización, almacenamiento y procesamiento (Davies, 1977; Hippe, 1988).

Las altas temperaturas y las bajas condiciones de humedad, son necesarias para la formación de la acrilamida siguiendo la ruta de la reacción de Maillard (Dunovská *et al.*, 2004).

En relación a la temperatura, estudios de distintos autores demostraron que el límite inferior para la formación de acrilamida, es de 120°C (Mottran *et al.*, 2002; Stadler *et al.*, 2002; Becalski *et al.*, 2003).

Debido a la distribución de la temperatura, que disminuye desde el exterior al interior de la papa, por causa de la resistencia conductiva de su matriz a la transferencia de calor por la evaporación de agua, el porcentaje de acrilamida, desde su superficie hasta su centro geométrico, no es el mismo en todas las zonas de una misma porción de una papa. En el caso de la hojuela de papa frita, este comportamiento va a depender del grosor de la hojuela (Gökmen *et al.*, 2006). Se demuestra así la importancia del contenido de humedad. La

evaporación de agua a altas temperaturas, disminuye rápidamente el contenido de humedad presente en la papa y se deben evitar, cuando se diseña un proceso de fritura en profundidad, la sobre cocción del interior y la sobre deshidratación de la superficie de la hojuela de papa.

Cuando la temperatura del aceite es alta, la deshidratación es más rápida y por lo tanto, estos altos niveles de temperatura y la baja humedad favorecen la formación de acrilamida. Un leve presecado superficial de las hojuelas de papas, que anteceda a la fritura, puede limitar la cantidad de acrilamida formada (Gökmen *et al.*, 2006). Una cantidad suficiente de agua presente en el material a freír, actúa como inhibidor de la formación de acrilamida, por lo que se hace muy relevante las relaciones contenido de agua – temperatura de fritura – temperatura interna de la papa durante la fritura.

El contenido final de agua de la hojuela de papa frita va a depender del proceso de transferencia de calor y de masa, explicada como la salida de agua y la absorción de aceite. El aceite y el agua son inmiscibles; para que la fritura ocurra, el calor se debe transferir de un medio no acuoso – aceite, a un medio acuoso – alimento (Gertz *et al.*, 2003). Si se quiere reducir el nivel de acrilamida formada durante el proceso de fritura en profundidad, se debe asegurar que las hojuelas de papas a freír, contengan una cantidad de agua superior a 10% al momento de ingresar al aceite caliente ya que por debajo de este valor, se inicia la formación de acrilamida (Ishihara *et al.*, 2006).

El pardeamiento de la hojuela de papa empieza cuando disminuye el contenido interno de agua y se incrementa la temperatura de fritura en la superficie. Por ello se piensa que un factor preponderante para la formación de acrilamida en la hojuela de papa, es la temperatura del aceite de fritura en el momento en que se inicia la reacción que da origen al pardeamiento. El proceso debe ser entonces regulado mediante la variable tiempo de fritura a fin de controlar la formación de acrilamida (Ishihara *et al.*, 2006).

Por encima de 150°C la producción de acrilamida aumenta significativamente. Sin embargo, el contenido de acrilamida se incrementó del orden de 10 veces en las hojuelas de papas fritas en aceite usado en relación al mismo producto frito en aceite fresco. Posiblemente a esta temperatura, la humedad del producto se encuentra por debajo de los valores críticos y la reacción de Maillard se acelera (Dunovská *et al.*, 2004). Otros autores establecieron la temperatura crítica alrededor de 175°C (Gertz *et al.*, 2002 y Yasuhara *et al.*, 2003).

Haase *et al.* (2003) señalaron que disminuyendo la temperatura de fritura de las hojuelas de papas de 185°C a 165°C, era posible reducir la formación de la acrilamida a la mitad. El contenido de azúcares reductores también está influenciado sustancialmente por la temperatura de almacenamiento de las papas; ya que la acumulación de azúcares se da a temperaturas menores a 10°C (Dunovská *et al.*, 2004). Sin embargo, la asparragina presente en las papas, no se modifica durante su conservación a baja temperatura antes de su procesamiento industrial (Olsson *et al.*, 2004). Ishihara *et al.* (2006) observaron que si se congelan las hojuelas de papas en nitrógeno líquido inmediatamente después de la fritura, puede producirse una reducción en la formación de acrilamida, comparado con el contenido de acrilamida en las hojuelas que se almacenaron a temperatura ambiente; debido a que se elimina el calor remanente que queda en las mismas al finalizar el proceso de fritura.

Endulzamiento a Bajas Temperaturas (*Low – Temperature Sweetening*)

De Wilde *et al.* (2005) señalaron que un almacenamiento a bajas temperaturas (~4°C) comparado con un almacenamiento a 8°C pareció realzar la formación de acrilamida debido al fuerte incremento de los azúcares reductores causado por las bajas temperaturas de almacenamiento. Debido a la naturaleza reversible de esta reacción fisiológica, es posible alcanzar una reducción significativa de los azúcares reductores después de un reacondicionamiento del almacenamiento en frío por 3 semanas a 15°C, para dichas papas con alto contenido de azúcares reductores.

El uso de inhibidores de brotación no influenció la composición de las papas, y por lo tanto, la formación de acrilamida no es susceptible a este tratamiento empleado en almacenamientos prolongados (De Wilde *et al.*, 2005).

Pretratamientos de Lavado, Escaldado, Inmersión y Acidificación

La combinación de ciertos pretratamientos con distintas temperaturas de fritura, han permitido reducir el contenido de acrilamida en hojuelas de papas a escala de laboratorio. Estas hojuelas obtenidas se sometieron a evaluación sensorial para determinar niveles de aceptabilidad y calidad organoléptica de estos productos por un panel entrenado (Masson, 2005, 2006).

Cuando se cortan las papas en rodajas, queda almidón libre en la superficie, lo que favorece que se adhieran entre si. Para evitar esto, el almidón se debe eliminar de la superficie mediante lavado antes de continuar con el proceso.

El efecto del **lavado** sobre las rodajas de papas sin freír, se manifiesta especialmente por la disminución de los azúcares reductores. El agua de lavado puede estar a diferentes temperaturas por lo que Ishihara *et al.* (2006) realizaron estudios para observar este efecto a 20°C, 40°C, 60°C y 80°C y evaluar el efecto de la temperatura del agua de lavado en la cantidad de azúcares reductores. Se evidenció reducción en los azúcares reductores a 60°C y 80°C aunque no a 40°C. Los autores sugieren que a 40°C, pudo actuar la invertasa nativa de la papa e igualmente comentan que la disminución a 60°C y 80°C podría deberse en parte a la gelatinización del almidón, que generalmente se inicia a 60°C ± 5°C y que a altas temperaturas, incide notablemente en la textura y propiedades sensoriales de las hojuelas de papas fritas.

Otra operación es el **escaldado**, cuyo objetivo es mejorar el color final de las hojuelas de papas; en esta operación se elimina por lixiviación o se reducen significativamente los azúcares reductores (Nuñez, 2001).

A la temperatura de fritura de 120°C, se evidenció una reducción significativa del contenido de acrilamida en hojuelas de papa de 26,8%, 61,5% y 71,4% respectivamente al aplicar cada uno de los tres tratamientos siguientes: 1) escaldado en agua destilada a 90 °C por 1 minuto, con agitación permanente; 2) inmersión en ácido cítrico 1% p/p por 1 hora, con agitación ocasional y 3) escaldado en agua destilada a 90 °C por 1 minuto, seguido de inmersión en ácido cítrico 1% p/p por 1 hora. De igual forma, reducciones de 57,0%, 65,0% y 99,4% respectivamente, se obtuvieron con una temperatura de fritura de 150°C; y una reducción de 48,4% al aplicar escaldado e inmersión, en las condiciones anteriores mencionadas y friendo a 180°C (Masson, 2005, 2006).

La reducción del contenido de azúcares por escaldado o remojo, condujo a la disminución del contenido de acrilamida en un 60% en hojuelas de papas (Haase *et al.*, 2003). El escaldado remueve más glucosa y fructosa que sacarosa. Se ha señalado una correlación de ($r^2 = 0,64$) entre el contenido total de los azúcares reductores con el contenido de acrilamida en el producto frito. Para monosacáridos como glucosa la correlación fue: $r^2 = 0,60$ y para fructosa: $r^2 = 0,56$, mientras que el contenido del disacárido no demostró ninguna correlación con el contenido de acrilamida (sacarosa $r^2 = 0,24$) (Haase *et al.*, 2003).

Bajas temperaturas de fritura, 120°C y el tratamiento de escaldado en agua caliente antes de la fritura, redujeron drásticamente el contenido de acrilamida en hojuelas de papas con respecto a controles sin escaldar; la única diferencia es que las papas obtenidas no presentaron una calidad sensorial deseable. El escaldado redujo la concentración de acrilamida en 68%, 75% y 49%, a temperaturas de 120°C, 150°C y 180°C, respectivamente (Pedreschi *et al.*, 2005).

Todo pretratamiento de **inmersión** de las rodajas de papas contribuyó a la disminución de aminoácidos. La temperatura del agua de inmersión no afectó el contenido de agua interna presente en el material sometido a este proceso; pero si afectó 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 los componentes que determinan la calidad sensorial de las papas, es decir, a los aminoácidos y a los azúcares reductores. Este punto es muy importante considerarlo cuando el material se trata en agua a altas temperaturas antes de la fritura (Ishihara *et al.*, 2006). Tanto la reducción de aminoácidos como de azúcares reductores aumenta al incrementarse el tiempo de pretratamiento en agua. Se recomienda que el pretratamiento de inmersión se realice a una temperatura alta y por largo tiempo, pero este pretratamiento conlleva el riesgo de alterar la calidad sensorial del producto final. En este caso, puede optarse por almacenar las hojuelas de papas fritas a temperaturas de congelación en nitrógeno líquido (Ishihara *et al.*, 2006).

Cuando se han ensayado diferentes temperaturas de fritura como 150°C, 170°C y 190°C los contenidos de glucosa y asparragina se correlacionan con la formación de acrilamida después de la fritura, para cada una de las temperaturas señaladas. Esta formación se incrementa notablemente en papas escaldadas, cuando la temperatura de fritura aumenta; por ejemplo, el contenido de acrilamida fue de 306, 2197 y 3562 $\mu\text{g kg}^{-1}$ después de freír a 150°C, 170°C y 190°C, respectivamente, lo anterior es válido para rodajas de papas escaldadas a 70°C por 8 minutos (Pedreschi *et al.*, 2004).

Otro pretratamiento de interés es la **acidificación**. Según Namiki *et al.* (1988) y Mlotkiewicz (1998), junto a la temperatura, el tiempo de reacción, el contenido de agua y las concentraciones y tipos de reactantes presentes, el pH es determinante en el porcentaje y grado de formación de los productos de la reacción de Maillard.

Jung *et al.* (2003) ha indicado que, aunque no se pueden descartar otros posibles mecanismos involucrados en este complejo sistema de reacciones químicas, está claro el

mecanismo de reducción de acrilamida en un medio ácido a través de la conversión del grupo α -amino nucleofílico libre desprotonado a amino no nucleofílico protonado.

La velocidad de reacción entre azúcares reductores y grupos amino de aminoácidos es máxima a pH débilmente ácido. La reducción del pardeamiento cuando se adicionan ácidos orgánicos puede ser atribuida al efecto inhibitorio del pH ácido sobre el desarrollo del pardeamiento no enzimático catalizado en medio alcalino. Por lo tanto, es posible que el ácido cítrico o aceites de fritura que lo contengan o se le adicione en niveles altos, induzcan la reducción del contenido de acrilamida en el alimento frito (Gertz *et al.*, 2003).

La extracción más eficiente de azúcares (60% – 80%) así como de asparragina (80%) se observó después de remojar las hojuelas de papas en soluciones de ácido acético o hidróxido de sodio, por un periodo de 60 minutos a 20°C. El ácido cítrico reduce el contenido de estos compuestos en porcentajes menores al 20%. Sin embargo, en ácido cítrico, la extracción más eficiente de azúcares y asparragina (aproximadamente 40%) se obtuvo después de escaldar las rodajas de papas por 3 minutos a 70°C (Kita *et al.*, 2004).

El pretratamiento de inmersión de las rodajas de papas crudas en solución de ácido cítrico, puede generar modificaciones de tipo organoléptico. El estudio de Jung *et al.* (2003), sobre el efecto de la concentración de las soluciones de ácido cítrico, demostró que se detectaba un leve gusto amargo y una textura más dura en el ensayo en que se someten las papas a inmersión en solución al 2% de ácido cítrico. Los autores establecieron que una concentración de 1% de ácido cítrico era el límite máximo para ser aplicado como pretratamiento.

El ácido cítrico adicionado al sistema de fritura de papas, tiene como efecto la disminución de la formación de dos grupos de compuestos característicos de la reacción de Maillard como lo son los aldehídos provenientes de la reacción de degradación de Strecker: metilpropanal y 2- y 3-metilbutanal y las alquilpirazinas: 2-etil-3,5-dimetilpirazina, 2-etil-

3,6-dimetilpirazina y 2,3-dietil-5-metilpirazina, lo cual afecta el desarrollo de aromas y sabores (Wagner y Grosch, 1998).

Gama-Baumgartner *et al.* (2004) encontraron que el contenido de acrilamida en papas *french*, después de 15 minutos de inmersión en una solución acuosa al 0,25% de ácido cítrico, disminuyó de $810 \mu\text{g kg}^{-1}$ a $400 \mu\text{g kg}^{-1}$. Gran parte de este efecto se debió a la extracción de la asparragina y los azúcares reductores en el agua. Se obtuvieron mejores resultados cuando dicha solución se empleó en caliente, manejando el mismo tiempo de inmersión y la concentración de la solución ácida. La inmersión en una solución ácida fría, generó en las rodajas de papas algunas regiones pardeadas que decrecieron con el tiempo de inmersión según Gama-Baumgartner *et al.* (2004). Debe tenerse en cuenta que a escala industrial, las papas siempre se lavan, incluso se escaldan y algunas veces se les adiciona ácido cítrico para mejorar la estabilidad de su color; por lo tanto, la aplicación de ácido cítrico para reducir el contenido de acrilamida no implica un paso adicional en el proceso de elaboración de este producto.

MATERIALES Y METODOS

Materiales

Lugar de Trabajo

Los análisis de caracterización química de la papa en forma natural, pretratada y frita, la aplicación de los pretratamientos de escaldado e inmersión y el proceso de fritura, se llevaron a cabo en el Centro de Investigación y Desarrollo en Grasas y Aceites, CIDGRA del Departamento de Ciencia de los Alimentos y Tecnología Química de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Chile.

Las determinaciones del contenido de acrilamida en las hojuelas de papas fritas de los diferentes ensayos, se llevaron a cabo en el Laboratorio de Toxicología de la Facultad de Ciencias Veterinarias de la Universidad de Chile y en la Agencia de la Administración Nacional de Alimentos de Suecia.

La evaluación sensorial de las hojuelas de papas fritas por parte del panel entrenado se realizó en el Laboratorio de Evaluación Sensorial del Departamento de Agroindustria y Enología de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile. La evaluación por parte de los consumidores se llevó a cabo en el Laboratorio de Evaluación Sensorial de Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Chile

Materia Prima

Se emplearon papas de la variedad Panda, de uso industrial para proceso de fritura. Las papas (un saco por lote) fueron adquiridas de la empresa Frutisa, de las temporadas de cosecha Abril y Agosto de 2006, provenientes de la IX Región y se almacenaron en una

cámara a temperatura de ~15°C. Cada mes señalado corresponde a un lote de trabajo, lote 1 y 2 respectivamente.

Materiales para determinación de acrilamida

Para la determinación de la acrilamida se empleó acetonitrilo grado HPLC, metanol grado HPLC, ácido acético glacial, agua grado HPLC, acrilamida 99% y acrilamida-2,3,3-d₃ 98% átomo D como estándar interno (SIGMA Aldrich, USA).

Para la extracción en fase sólida del analito se utilizó el sistema Vacuum manifold, con las columnas SPE column “Multimode”: Isolute Multimode, 1000 mg/ 6 mL, IST (International Sorbent Technology Ltda., Hengoed, Mid Glamorgan, UK) y SPE column “ENV+” Isolute, 500 mg/ 6 ml, from IST (International Sorbent Technology Ltd., Hengoed, Mid Glamorgan, UK).

La detección por HPLC MS/MS constó de un inyector de 10 µL, 2 bombas isocráticas PE200 micro (Perkin Elmer Inc, USA), flujo de la fase móvil de 0,4 mL/minuto; columna del HPLC Hypercarb, 5 µm, 50 x 3 mm y pre-columna 5 µm, 10x3 mm (Thermo Hypersil-Keystone, USA), detector de masa triple cuadrupolo LC/MS/MS Mass Spectrometer API 4000 (Applied Biosystems, USA).

Método

Determinaciones Analíticas

Estas determinaciones se hicieron por duplicado, tanto en las hojuelas crudas como en las sometidas a los diferentes pretratamientos y en el producto final (cuadros 2, 3 y 4).

- **Humedad:** AOCS, Ai 2 75 (93).1993. Moisture and volatile matter. Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists`Soc, 3th Edition, Champaing, Illinois. USA.
- **Azúcares totales:** Determinación colorimétrica por el método de la Antrona, previa hidrólisis con ácido perclórico. (Osborne y Voogt, 1986).
- **Azúcares reductores libres:** Determinación colorimétrica por el método de la Antrona, sin hidrólisis con ácido perclórico. (Osborne y Voogt, 1986).
- **Determinación del pH:** Se empleó el equipo CORNING modelo pH-meter 320, USA. La calibración de los electrodos se realizó con solución tampón pH 4 y 7 a 20°C, según la especificación del equipo. Se diluyó la muestra en agua destilada en relación 9:1.
- **Materia grasa:** AOCS, Ai 3 75. (93). 1993. Total fat. Official Methods and recommended Practices of the American Oil Chemists`Soc, 3th Edition, Champaing, Illinois. USA.
- **Actividad de Agua (Aw):** Se empleó el equipo THERMOCONSTANTER, Novasina (Suiza). Se introdujo la muestra y se registró su Aw hasta lograr equilibrio (2 – 3 horas) a 25°C.
- **Asparragina:** Se determinó por HPLC, usando una bomba terciaria L-6200 (Merck Hitachi, NJ, USA), un detector de fluorescencia (F-1050, Merck Hitachi, NJ, USA) con λ de excitación y emisión de 250 nm y 395 nm respectivamente, conectado a un terminal con interfase (Clarity™, Chromatographic Station for Windows™). La columna empleada fue la AccQ Tag, 5 μ m, 3,9 mm x 150 mm (Waters Corp., Milford, MA, USA). Se usó como fase móvil, un sistema de gradiente acetonitrilo : agua (60:40) y una solución buffer pH 5,04 (Cohen y Michaud, 1993).
Para la extracción y derivatización del aminoácido, se hizo reaccionar 20 μ L de muestra de papa en 20 μ L de Reactivo de Acc. Flour y 60 mL de buffer borato. El contenido de asparragina se determinó mediante el método de estándar externo; la asparragina estándar fue suministrada por Sigma-Aldrich Corp., St. Louis, MO, USA.

Determinación de Acrilamida

El método usado para la detección de acrilamida en este estudio fue Cromatografía líquida y espectrometría de masas (LC-MS/MS), basado en el método desarrollado por Petersson *et al.* (2006) de la Administración Nacional de Alimentos de Suecia. Este método comprendió una primera extracción en medio acuoso, 2 *clean-up* (purificación y limpieza) en fase sólida SPE y empleo de una columna de carbón grafitizado como fase estacionaria para la separación cromatográfica. Este método se operó en modo de electrospray positivo.

Análisis Sensorial

Se incluyó una séptima muestra comercial denominada ARTESANAL, marca Lay's (fabricación chilena) en las evaluaciones sensoriales, con el objeto de hacer comparaciones de calidad y aceptabilidad.

Para los 6 tratamientos y la marca comercial, se evaluó la aceptabilidad, empleando el método de la Escala Hedónica, a través de una escala no estructurada (Anexo 1), con un panel de consumidores compuesto por 50 evaluadores.

La determinación de calidad sensorial de las hojuelas de papas fritas y la marca comercial, se realizó utilizando el método descriptivo. Se efectuó con 8 evaluadores entrenados quienes calificaron, en una escala no estructurada de 0 a 15 centímetros, los parámetros: color amarillo, pardeamiento, transparencia, crocancia, dureza, presencia de sabores extraños y grado aparente de aceitosidad (anexo 2).

Los resultados de ambas evaluaciones, se analizaron a través de análisis de varianza y prueba de comparación múltiple con el Test de Tukey ($\alpha = 0,05$). Se usó el software Statgraphics Plus 5.1 (2001, Statistical Graphics Corp., USA).

Diseño Experimental

Se basó en un diseño multifactorial, donde se evaluó el efecto de dos factores; el pretratamiento a aplicar (escaldado y acidificación) y la temperatura de fritura, sobre el contenido de acrilamida (ppb) en las hojuelas de papas fritas, siendo ésta la variable de respuesta. Este estudio se llevó a cabo por duplicado, cada ensayo general se denominó Lote 1 y Lote 2, respectivamente.

Factor Pretratamiento:

Nivel 1: llamado Con Pretratamiento (T); Escaldado en agua destilada a 90 °C por 1 minuto, seguido de inmersión en solución de ácido cítrico 0,25% p/p, a temperatura ambiente por una hora.

Nivel 2: llamado Control (C); hojuelas de papas previamente lavadas por 1 minuto con agua destilada, sin someter a ningún pretratamiento.

Factor Temperatura: Se usaron tres temperaturas de fritura (niveles): 150°C, 160°C y 170°C. El tiempo de fritura se determinó mediante ensayos previos, este tiempo fue el necesario para que las hojuelas de papas fritas alcanzaran una humedad final aproximada de 2,0%.

Los datos obtenidos se analizaron aplicando análisis de varianza y Test de comparación múltiple de Tukey, con una significancia estadística representada en un $p < 0,05$. La matriz desarrollada se expresa en el Cuadro 1. Los resultados se analizaron con el software Design Expert 7.0.0 (2005, Stat Ease, Inc., USA).

Cuadro 1. Matriz del diseño experimental.

Pretratamiento	Temperatura (°C)	Tratamientos
Control	150	150C lote 1
	150	150C lote 2
	160	160C lote 1
	160	160C lote 2
	170	170C lote 1
	170	170C lote 2
Escaldado e inmersión	150	150T lote 1
	150	150T lote 2
	160	160T lote 1
	160	160T lote 2
	170	170T lote 1
	170	170T lote 2

Total de tratamientos: 12

Se aplicó el diagrama de flujo de proceso de la Figura 3, para obtener las hojuelas de papas fritas.

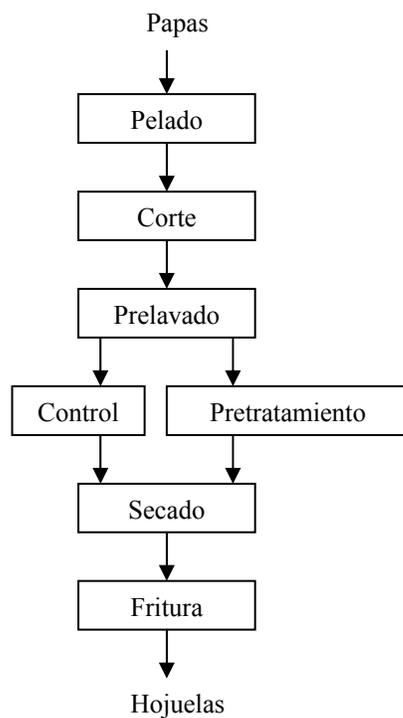


Figura 3. Diagrama de flujo de proceso de elaboración de hojuelas de papas fritas.

Descripción del Proceso de Elaboración de las Hojuelas de Papas Fritas

- **Lavado:** Se realizó con una ducha de agua destilada para retirar impurezas.
- **Pelado:** Se empleó un pelador manual.
- **Corte:** Las hojuelas se cortaron de un grosor de $1,5 \pm 0,1$ mm, empleando el procesador industrial SOMELA, modelo FP-600, de fabricación china.
- **Lavado previo de las hojuelas de papa:** Se lavaron con agua destilada por un minuto. La relación papa pelada : agua de prelavado fue de 1:12,5.
- **Escaldado en agua destilada:** Se sometieron a escaldado en agua destilada a 90 °C por 1 minuto, con agitación constante. Se manejó una relación papa : agua de escaldado de 1:18.
- **Inmersión en solución de ácido cítrico:** Se procedió a inmersión en solución de ácido cítrico 0,25% p/p a temperatura ambiente, por 1 hora, con agitación ocasional. La relación papa : solución de ácido cítrico fue de 1:20.
- **Secado:** Se secaron manualmente, utilizando toallas de papel absorbente antes de freirlas.
- **Fritura a presión atmosférica:** Se empleó un freidor eléctrico (T-FAL modelo 628760, Francia), con capacidad de 2,0 litros. La unidad experimental fue de ~100 g de hojuelas de papas crudas a freir en cada ciclo de fritura, formando una monocapa de hojuelas para evitar su adherencia; se usó aceite refinado de maíz obtenido de Corn Products Chile Inducorn S.A. Las temperaturas de fritura empleadas fueron 150 °C, 160 °C y 170 °C. La relación papa : aceite fue de 1:20. Al finalizar la fritura de las muestras pretratadas a cada una de las 3 temperaturas señaladas, se hizo cambio de aceite, para luego freir las muestras controles sin pretratamientos.

Se realizó un seguimiento del comportamiento de la temperatura en función del tiempo de fritura, a través de la instalación de un sistema de termocuplas, tanto en el aceite como en el interior de la hojuela de papa (Figura 4). Se registró la temperatura inicial en ambos medios y posteriormente, 10 temperaturas cada 48 s, 42 s y 30 s, para 150°C, 160°C y 170°C, respectivamente.

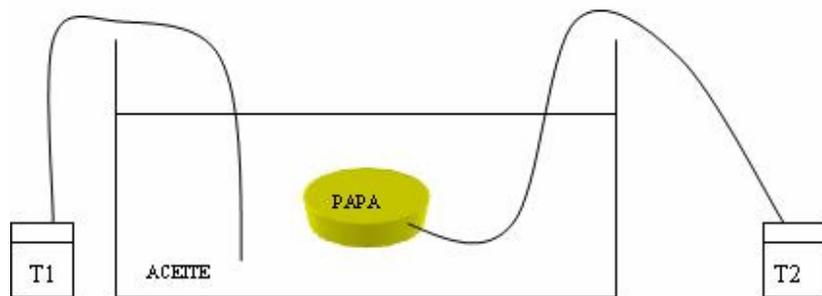


Figura 4. Esquema del sistema de fritura, T1 y T2 son Termocupla 1 y Termocupla 2, respetivamente.

La Figura 5 muestra imágenes de la papas en su estado natural, la forma como se llevaron a cabo los pretratamientos de escaldado e inmersión en solución de ácido cítrico y las hojuelas de papas fritas.



A. Papas, Var. Panda



B. Escaldado



C. Inmersión en solución de ácido



D. Rodajas de papas crudas



E. Hojuelas de papas fritas

Figura 5: Proceso de elaboración de hojuelas de papas fritas.

RESULTADOS Y DISCUSION

Caracterización de la Materia Prima

En el Cuadro 2 se observan los valores obtenidos para las diferentes determinaciones analíticas en diferentes etapas del proceso de elaboración de hojuelas de papas fritas, antes de la fritura, y que se ajustan tanto a los tratamientos con aplicación de escaldado e inmersión en solución de ácido cítrico como a los tratamientos control. Estos resultados corresponden al lote 1.

Cuadro 2. Caracterización química de las papas del lote 1 en diferentes etapas de proceso (base seca, BS).

Lote 1	Humedad	Azúcares totales	Azúcares libres	Asparragina
	g%	g% (% reducción)	g% (% reducción)	ppm (% reducción)
Papa, materia prima	69,4	77,8	1,50	7033
Hojuelas, prelavado	72,5	71,6 (8,0)	1,31 (12,7)	7236
Hojuelas, escaldado	73,8	70,0 (2,2)	1,07 (18,3)	6210 (14,2)
Hojuelas, ac. Cítrico	75,8	70,0 (0,0)	0,91 (14,9)	2380 (61,7)

La papa en su estado natural, se ve modificada en sus contenidos de hidratos de carbono, totales y libres y asparragina, una vez que se aplican el prelavado con agua destilada a temperatura ambiente, el escaldado en agua destilada a 90°C por un minuto y la inmersión en solución de ácido cítrico 0,25%.

El contenido de agua aumentó levemente de una etapa del proceso a otra al aplicar los pretratamientos, lo que es lógico ya que cada operación implicaba el uso de agua. De esta forma, se aseguró que las papas entren a la fritura con una cantidad de agua elevada (mayor a 10%) para garantizar un contenido reducido de acrilamida después de la fritura (Ishihara *et al.*, 2006); además, el contenido final de agua de la papa sometida a estos pretratamientos

tiende al equilibrio acuoso, por tratarse de sistemas de osmosis y difusión, de ahí que su variabilidad no es representativa.

De acuerdo con Ishihara *et al.* (2006), el prelavado disminuyó sustancialmente como era de esperarse tanto el contenido de almidón superficial expuesto después del corte de la papa en rodajas (8,0% de reducción) como los hidratos de carbono libres; en este caso, los azúcares reductores (12,7% de reducción) que podrían actuar como potenciales precursores en la formación de acrilamida. La temperatura ambiente del agua de prelavado empleada evitó que se presentaran reacciones de gelatinización del almidón, desintegración de las células de almidón de la papa (a temperaturas > 60°C) o la intervención de enzimas hidrolíticas nativas de la papa que pudieran incrementar el contenido de azúcares reductores.

Teniendo en cuenta el planteamiento de Ishihara *et al.* (2006), la temperatura del agua de prelavado incide notablemente en la disminución de azúcares reductores; este compuesto es muy importante para generar los parámetros propios de la calidad sensorial en papas, en lo que respecta a pardeamiento, aroma, sabor y textura, por lo que es más adecuado llevar a cabo, a escala industrial, prelavados con agua a temperatura ambiente; así se favorecen la disminución de los azúcares reductores, las características de calidad sensorial en el producto final después de la fritura y lógicamente, los costos que implicaría elevar la temperatura del agua de prelavado. Además, en esta investigación, no se justificó prelavar con agua a temperatura más alta que la ambiente, puesto que después del prelavado se hizo un escaldado a alta temperatura. Es de esperarse que si se aumenta el tiempo de prelavado con agua, resulte principalmente una mayor disminución del contenido de azúcares reductores.

El escaldado con agua destilada a 90°C por 1 minuto, además de reducir el contenido de azúcares totales en un 2,2% y libres en un 18,3%, la asparragina se ve afectada por este pretratamiento térmico, donde se obtuvo una reducción de 14,2%.

La inmersión en ácido cítrico no influyó determinante en la reducción de los azúcares reductores pero si en el contenido de asparragina, equivalente a un 62%, lo que predice la efectividad del pretratamiento en la disminución del contenido de este aminoácido en su forma libre. No se registró reducción en el contenido de azúcares totales, por lo que la acidificación no afectó a estos compuestos.

La reducción total porcentual de hidratos de carbono totales fue de 10,2%, la reducción de hidratos de carbono reductores fue de 45,9% y la asparragina se redujo en 75,9%, exceptuando el efecto de prelavado.

Rol del agua en la formación de acrilamida

Otro factor a considerar en la ruta de síntesis de acrilamida y donde influye la humedad del sistema o matriz alimenticia, es lo concerniente a su formación a través de la vía glicerol por oxidación de la acroleína a ácido acrílico el cual reacciona con amonio proveniente de aminoácidos. El glicerol puede formarse a partir de la hidrólisis de triglicéridos. Cuando se utiliza sucesivamente la misma materia grasa en fritura de profundidad, es de esperarse la presencia de mono- y diglicéridos. Esta degradación hidrolítica produce ácidos grasos volátiles como octanoatos (C8:0) y heptanoatos (C7:0). La fracción remanente de triacilglicerol contiene fragmentos en posición 1° y 3°, resultando en una masa de bajo peso molecular la cual es igual al diacilglicerol (Gertz *et al.*, 2003). El glicerol no libre formado podría actuar como precursor de la acrilamida (Márquez y Dobarganes, 1996).

La hipótesis de formación de acrilamida vía acroleína tiene dos visiones científicas opuestas; Yasuhara *et al.* (2003) afirmaron que es válida la idea que el glicerol producido de la hidrólisis de lípidos, como la trioleína, forma acroleína vía reacción de deshidratación. La acroleína fue oxidada para producir ácido acrílico, el cual seguidamente reaccionó con amonio proveniente de la asparragina para producir acrilamida (Morrison y Boyd, 1992). Es bien conocido que los triglicéridos producen una gran cantidad de acroleína a partir de

tratamientos térmicos. Por ejemplo, cuando varios aceites de cocina se calentaron a 300°C por 2 horas, se formó una gran cantidad de acroleína (Umano y Shibamoto, 1987).

Por otra parte, Mestdagh *et al.* (2007) concluyeron que los productos de la hidrólisis influyen en el intercambio calórico entre el aceite y el alimento, pero estos cambios no afectan la formación de acrilamida en el mismo grado, por lo tanto, no existe una relación significativamente positiva entre dichos productos, mono-, di- y triglicéridos, con la formación de acrilamida.

Como se puede apreciar, las posiciones son aún contradictorias en cuanto a la ruta de síntesis de acrilamida y particularmente, el papel que juega el agua libre presente en la matriz del alimento como factor regulador de gran importancia en la formación de acrilamida. Se puede decir entonces que se hace necesario, como medida preventiva, controlar el contenido de agua presente en el alimento al momento de someterlo al tratamiento térmico de fritura; asegurar un contenido superior a 10% y vigilar mediante mediciones de la acidez del aceite, su grado de deterioro hidrolítico, seguido del cambio total del aceite una vez se determine la presencia crítica de mono- y diglicéridos que puedan conllevar a la formación de acroleína.

En el segundo lote (cuadro 3), se midió, además de la humedad, los hidratos de carbono totales y libres y la asparragina, el pH de las hojuelas de papas, para observar su comportamiento con la aplicación de los diferentes pretratamientos.

Cuadro 3. Caracterización química de las papas del lote 2 en diferentes etapas de proceso (base seca, BS).

Lote 2	Humedad	Azúcares totales	Azúcares libres	pH	Asparragina
	g%	g% (% reducción)	g% (% reducción)		ppm (% reducción)
Papa, materia prima	72,3	80,9	1,73	6,03	7794
Hojuelas, prelavado	76,2	78,2 (3,3)	1,34 (22,5)	6,01	8319
Hojuelas, escaldado	77,2	77,2 (1,28)	1,14 (14,9)	6,01	6281 (24,5)
Hojuelas, ac. cítrico	78,8	77,1 (0,1)	0,99 (13,2)	3,99	3042 (51,6)

La reducción total porcentual de azúcares totales fue de 4,68%, la reducción de azúcares libres fue de 50,6% y la asparragina se redujo en 76,1%, exceptuando el efecto de prelavado. La asparragina, al igual que en el lote 1, no presenta reducción al aplicar el prelavado; el aumento aparente es consecuencia directa de su forma de expresión en base seca.

Los resultados obtenidos presentan la misma tendencia de comportamiento que los presentados por el lote 1, con la salvedad que los contenidos de azúcares totales, libres y asparragina aumentaron con el tiempo, lo anterior pudo deberse a los procesos de degeneración fisiológica propia de la papa o a factores propios de las condiciones de cultivo, que pudieron cambiar con el tiempo y afectaron estos contenidos (fertilización, factores agroclimáticos, prácticas de laboreo)

El pH inicial de la papa disminuyó levemente después de prelavar y escaldar las hojuelas, posiblemente por dilución de los ácidos orgánicos propios de la papa; pero este parámetro se redujo en un 34% después de someter las hojuelas a inmersión en la solución de ácido cítrico. El carácter ácido de esta solución, aparentemente no afecta considerablemente el contenido de azúcares totales y libres, por lo que su aplicación con fines de reducción de azúcares no es vital, pero si la finalidad es reducir el contenido de asparragina, constituye el pretratamiento experimentado más efectivo puesto que se obtuvo una reducción del orden del 52%.

El grado de protonación de un aminoácido a un pH dado está dado por el valor pK_a , que naturalmente oscila entre 9,3 y 9,8 para los aminoácidos, a 25°C. A un pH de ~8,0 el grupo α -amino de la asparragina, la cual exhibe un excepcional pK_a de $\approx 8,9$ a 25°C, es protonado a un grado muy bajo. Por esta razón, a este pH, la asparragina es más propensa a reaccionar con electrófilos, por ejemplo grupos carbonilo de hidratos de carbono, resultando en la formación de la base de Schiff. Esta reacción se considera la etapa inicial en la formación de acrilamida (Rydberg *et al.*, 2003).

Es indiscutible que el descenso del pH afectó considerablemente la capacidad de reacción del grupo α -amino de la asparragina, por lo que se comprueba que la etapa inicial de la reacción de Maillard es pH-dependiente, en concordancia con lo que exponen Namiki *et al.* (1988), Mlotkiewicz (1998) y Jung *et al.* (2003).

Kita *et al.* (2004) corroboró que el ácido cítrico es eficiente para la extracción de azúcares y asparragina (~40%) previo escaldado de las rodajas de papas a 70°C por 3 minutos. Se puede decir entonces que según los resultados obtenidos en esta investigación, el efecto reductor del escaldado se traduce en la disminución de los azúcares reductores; y si posterior a ello, las papas se sumergen en soluciones ácidas, este pretratamiento refleja su efecto en la disminución de la asparragina libre. Se concluye entonces, que tanto el escaldado como la inmersión en solución de ácido cítrico, son pretratamientos complementarios y no sustitutos.

En el Cuadro 4 se muestran los resultados de la caracterización química de los diferentes tratamientos sometidos a fritura a presión atmosférica. Los análisis se hicieron sobre las hojuelas de papas fritas.

La determinación del contenido de asparragina, pH y actividad acuosa A_w , en el producto final, solo se efectuaron en los tratamientos del segundo lote, por requerimientos propios del Proyecto HEATOX según *The HEATOX project - 30 months meeting*, Graz, Austria, junio de 2006; no se habían considerado en el ensayo inicial, por lo que no se realizaron.

Cuadro 4. Caracterización química de las hojuelas de papas fritas (BS).

TRATAMIENTO	Humedad*	Materia Grasa*	pH	Aw	Asparragina
	g%	g%			ppm
150 T	3,2	36,2	4,1	0,300	677
160 T	2,5	38,2	4,5	0,349	343
170 T	3,4	37,5	4,1	0,294	254
150 C	3,7	36,7	6,0	0,319	1840
160 C	2,2	37,8	6,0	0,320	2280
170 C	2,7	38,4	6,0	0,330	1586

150, 160 y 170 son temperaturas (°C); T, con aplicación de los pretratamientos de escaldado e inmersión; C, tratamiento control sin pretratamientos; * corresponde a los promedios de los dos lotes.

La humedad resultante varía según el tiempo y temperatura de fritura; para freír a 150°C, el tiempo fue de 8 minutos; 160°C por 7 minutos y 170°C por 5 minutos. Se puede considerar una pérdida de agua por evaporación promedio de 70%, y una absorción de aceite promedio de 35%, partiendo del hecho que la materia prima presentó un contenido graso de ~0,2%. La Figura 6 describe el comportamiento del pH y la actividad acuosa (Aw) en los diferentes tratamientos.

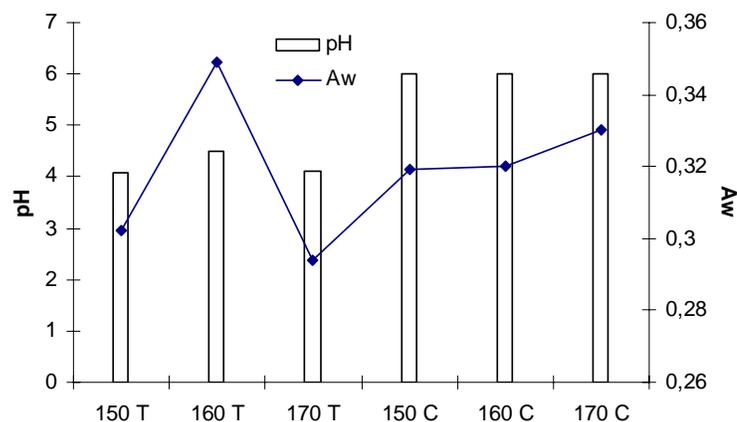


Figura 6. Valores de pH y Aw en los diferentes tratamientos de hojuelas de papas fritas.

El pH de 3,99 (cuadro 3) alcanzado por las papas después de la inmersión en solución de ácido cítrico no presentó un aumento significativo durante la fritura, llegando a valores comprendidos entre 4,1 y 4,5; lo anterior explica el leve gusto ácido percibido por los jueces durante la evaluación sensorial y descrito con el parámetro presencia de sabor extraño en el anexo 2.

Los tratamientos control no presentaron entre ellos diferencias significativas en cuanto al pH, comparados con su materia prima inicial que fue la papa prelavada y sin aplicación de pretratamientos, manteniéndose en un pH de 6,0. Por lo tanto, las temperaturas de fritura empleadas y la calidad del aceite, no influyeron en el pH de las hojuelas de papa fritas.

Los valores de actividad acuosa, en este caso, son útiles al momento de hacer referencia a la estabilidad del producto frente a posibles riesgos microbiológicos durante su vida útil. Este pequeño rango de A_w comprendido entre 0,30 y 0,35, revelan que no existe riesgo de contaminación microbiológica. En este rango de actividad acuosa, se favorecen las reacciones de oxidación lipídica, aunque no se pueden dar debido a la baja humedad del sistema a pesar del alto contenido de materia grasa presente.

El contenido de asparragina en el producto frito pretratado, comparado con 3042 ppm (BS) (Cuadro 3) obtenido después de someter las hojuelas de papas (lote 2) en la solución de ácido cítrico mostró una reducción de 78%, 89% y 92%, para los tratamientos 150T, 160T y 170T, respectivamente; ahora, comparando su contenido final (después de fritura) en los tratamientos control con su contenido en las papas después del prelavado [7794 ppm (BS)], las reducciones fueron de 76%, 71% y 80%, para 150C, 160C y 170C, respectivamente.

En la Figura 7 se detallan el comportamiento de los porcentajes de reducción de la asparragina durante el proceso de fritura y su relación con el pH.

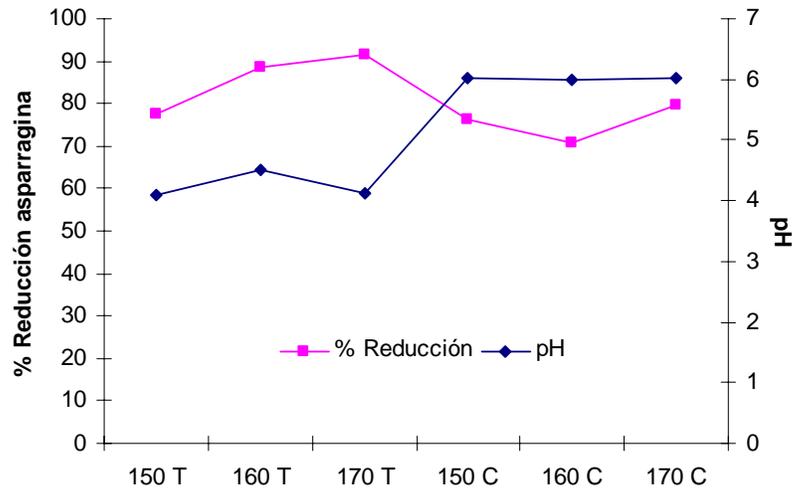


Figura 7. Porcentajes de reducción de asparagina durante la fritura de los diferentes tratamientos y su relación con el pH.

Según los porcentajes de reducción anteriores, estos corresponderían a la fracción de la asparagina total inicial que reacciona con los grupos carbonilos de los azúcares reductores, para generar los diferentes productos intermedios de la reacción de Maillard, entre estos la acrilamida. Se observó que aunque los porcentajes de reducción son altos, superiores al 71%, queda una fracción remanente de asparagina libre en las hojuelas de papas.

Exceptuando el tratamiento 160C (ver también Figura 11), el consumo de asparagina aumentó al incrementarse la temperatura de fritura, por lo que la temperatura de fritura es el factor físico más importante en la formación de acrilamida (Mottran *et al.*, 2002; Stadler *et al.*, 2002; Becalski *et al.*, 2003; Matthäus *et al.*, 2004; Pedreschi *et al.*, 2005).

La asparagina también se puede descomponer térmicamente, tal como lo afirmaron Yaylayan *et al.* (2003), produciendo principalmente maleimidina debido a la rápida reacción de ciclación intramolecular que previene la formación de acrilamida.

Además, se puede decir que el pH de las papas pretratadas ($\sim 4,0$) evita la reacción de formación del compuesto *N*-glicosilasparagina, y por ende, la iniciación de la síntesis de acrilamida vía la decarboxilación de la base de Schiff.

Relación Temperatura de Fritura – Tiempo de Fritura

Los resultados de las mediciones de la Temperatura de fritura ($^{\circ}\text{C}$) en función del Tiempo de fritura (s), se presentan en la Figura 8.

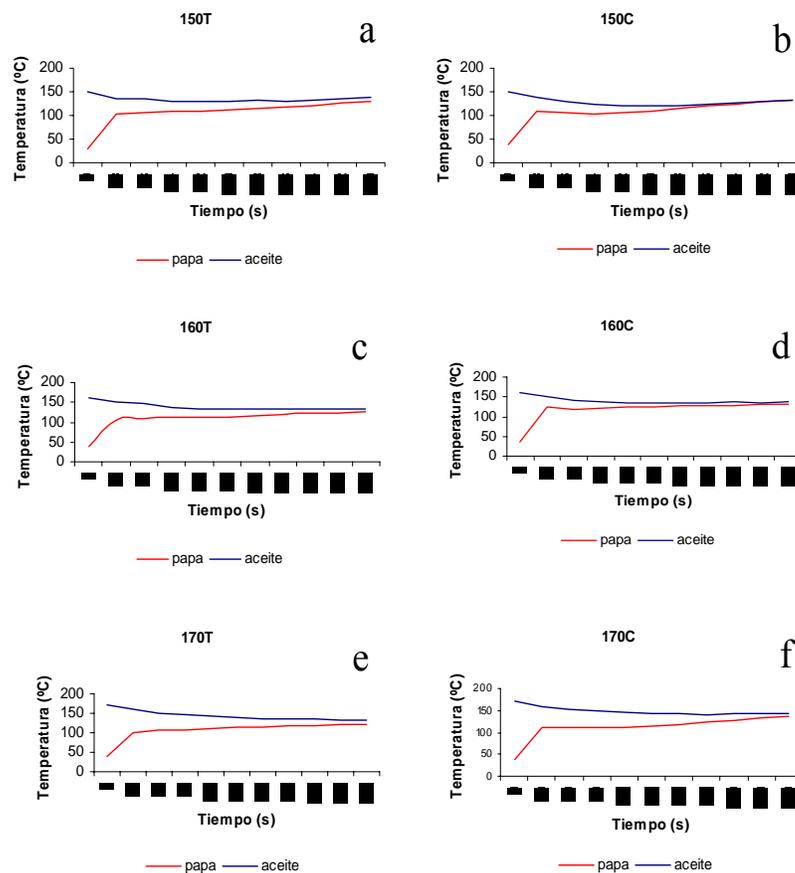


Figura 8. Relación Temperatura de fritura ($^{\circ}\text{C}$) – Tiempo de fritura (s), de los tratamientos evaluados: (a) 150T; (b) 150C, (c) 160T; (d) 160C, (e) 170T; (f) 170C.

Se aprecia un comportamiento similar en las 6 relaciones Temperatura de fritura - Tiempo de fritura presentadas en la Figura 8. El punto final de la fritura se alcanzó cuando la temperatura interna de las hojuelas se acercó o se igualó a la temperatura del aceite.

La fritura es básicamente un proceso de deshidratación en el cual el aceite actúa como medio de transferencia de calor. Después que el alimento es sumergido en el aceite, se forma una delgada capa superficial cuyo grosor está cercano a 0,3 mm (Ngadi *et al.*, 2000). La temperatura en esta región es igual a la temperatura de fritura. Después que esta zona límite es deshidratada, el agua migra de posiciones internas hacia la costra formada para reemplazar el agua que se está evaporando. La presión de vapor del alimento es constantemente alta (Vitrac *et al.*, 2000). Cuando el alimento se sobre cuece, el agua capilar ubicada en la zona límite deja el alimento; finalmente el alimento queda seco y generalmente hueco o esponjoso al interior, cuando su contenido de agua es alto. La acrilamida formada y sus precursores tienden a salir del alimento con el vapor pero quedan retenidos debido a la resistencia de la porosidad de la costra o la capilaridad de la matriz, haciendo que el producto no presente un pardeamiento ni una sequedad excesiva (Gertz *et al.*, 2003), condiciones que desde el punto de vista organoléptico, son aceptables.

Durante la fritura a presión atmosférica, todo el calor transferido desde el aceite caliente utilizado para incrementar la energía térmica interna de la hojuela de papa alcanzó una temperatura levemente por encima del punto de ebullición del agua (~110°C); después de este punto, la evaporación del agua empieza a extraer una buena cantidad de la energía que entra al sistema.

Cuando la temperatura del aceite de fritura alcanzó un promedio de 136°C, la energía que entra a la papa se limita; por lo tanto, la temperatura interna de la hojuela, que en este caso fue de 129°C, trata de nivelarse con la temperatura del aceite.

El comportamiento de las temperaturas de la Figura 8 coincide con lo que afirma Gertz *et al.*, (2003) y Gökmen *et al.* (2006) en cuanto a la relación directa que existe entre la

cantidad de humedad inicial con la que la hojuela entra a la fritura, la resistencia de la matriz de la papa a la evaporación de dicha humedad y la temperatura de fritura en el que se inicia la formación de acrilamida.

Rendimiento del Proceso de Elaboración de Hojuelas de Papa Fritas

Al ser el proceso de elaboración de hojuelas de papas fritas, una secuencia de operaciones mecánicas, de transferencia de masa y calor, es importante presentar los rendimientos en dos puntos críticos del mismo: (a) rendimiento (%) de la papa pelada y (b) rendimiento (%) después de la fritura. Los resultados se muestran en la Figura 9.

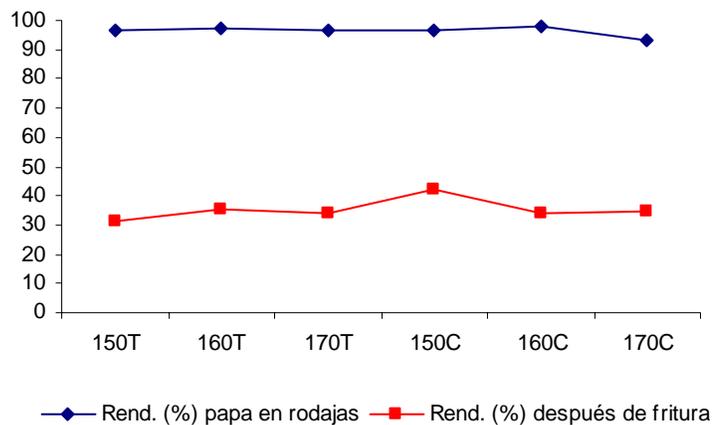


Figura 9. Rendimientos del proceso para cada uno de los tratamientos aplicados.

Se obtuvo un rendimiento promedio de $96,34\% \pm 1,5$ después de pelar, cortar las papas en rodajas y pesarlas, con respecto a la materia prima entera inicial que entra al proceso. Lo anterior indica que por efecto del pelado y corte, se obtuvieron pérdidas del orden de 3,7%. En cuanto al rendimiento final del proceso, el rango porcentual oscila entre 31,06% y 41,90%; las pérdidas se debieron a la evaporación de agua principalmente, aunque este valor se ve recompensado con la cantidad de aceite absorbido.

Análisis del Contenido de Acrilamida y su Relación con los Precusores Presentes

En el cuadro 5 se detallan los resultados del contenido de acrilamida (ppb) por cada lote, factor y nivel analizados, para un total de 12 tratamientos.

Cuadro 5. Contenido de acrilamida en los diferentes tratamientos (BS).

Pretratamiento	Temperatura (°C)	Tratamiento	Acrilamida (ppb)
Escaldado e inmersión	150	150T lote 1	ND
	150	150T lote 2	5,83
	160	160T lote 1	7,25
	160	160T lote 2	2,48
	170	170T lote 1	2,26
	170	170T lote 2	30,22
Control	150	150C lote 1	ND
	150	150C lote 2	496,62
	160	160C lote 1	46,06
	160	160C lote 2	521,93
	170	170C lote 1	36,62
	170	170C lote 2	808,36

ND: no detectado

La Figura 10 presenta con mayor claridad las diferencias entre los contenidos de acrilamida, teniendo en cuenta el efecto de los lotes, la aplicación o no de los pretratamientos y las tres temperaturas de fritura evaluadas.

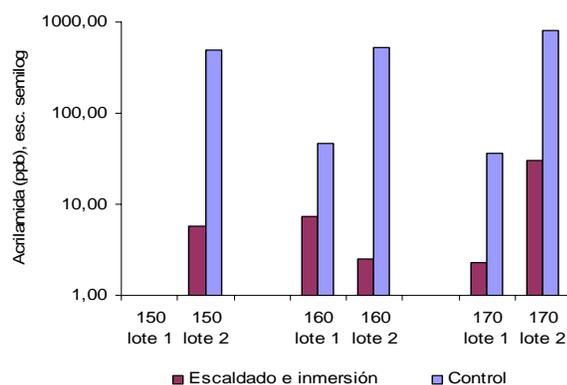


Figura 10. Contenido de acrilamida (ppb) de los tratamientos analizados.

Inicialmente, es indiscutible el efecto positivo que tiene la aplicación de los pretratamientos de escaldado e inmersión en solución de ácido cítrico sobre la reducción del contenido de acrilamida en los 6 tratamientos diferentes de hojuelas de papas fritas. Debido a que el contenido de acrilamida de los tratamientos 150T lote 1 y 150C lote 1 estuvo por debajo del límite de detección del HPLC, este valor se muestra como ND (no detectado). La acrilamida se reduce en 84 veces entre los tratamientos 150T lote 2 y 150C lote 2, lo que se traduce en la efectividad de los pretratamientos, además de la baja temperatura de fritura y la alta humedad presente en la muestra. Sin embargo, el tratamiento 150T no fue el mejor evaluado sensorialmente.

En cuanto a los tratamientos realizados a 160°C, el comportamiento observado hace notoria la efectividad del pretratamiento, por ejemplo, entre los tratamientos 160T y 160C del lote 1, hubo un 84% de reducción del contenido de acrilamida y entre el 160T y 160C del lote 2, la reducción fue del orden del 99,5%.

Si se analiza el efecto lote, se nota que hay un comportamiento inverso entre los tratamientos 160T lote 1 y 160T lote 2; en este último, se obtuvo un menor contenido de azúcares reductores después de ser pretratado, pero es insignificante la diferencia, siendo no atribuible el menor contenido de acrilamida a esta causa; pero si posiblemente a la diferencia entre los contenidos de humedad, mayor en el lote 2, que en lote 1 y que según Ishihara *et al.* (2006), la presencia de agua potencia la formación de acrilamida positivamente. También es de recordar que la formación de acrilamida depende de muchos factores, no solo químicos, sino también agronómicos propios del cultivo o físicos propios de las variables del proceso productivo (Gertz *et al.*, 2003; Surdyk *et al.*, 2004; Low *et al.*, 2006); además, es posible que se genere por otras rutas de formación (Gertz *et al.*, 2003; Mestdagh *et al.* 2007).

En los tratamientos a 170°C, tanto el efecto lote como la aplicación de los pretratamientos si mostraron resultados de reducción de acrilamida acordes al postulado de la hipótesis de este informe, la cual plantea reducciones altamente significativas. Se obtuvieron

reducciones de 94% y 97%, entre los tratamientos 170T lote 1 y 2 y entre 170C lote 1 y 2, respectivamente, lo que indicó la significancia considerable de los pretratamientos sobre los precursores de la acrilamida, a esta temperatura crítica de formación. Los contenidos de acrilamida de los tratamientos control reflejan la importancia de la temperatura de fritura en la síntesis de acrilamida.

En el lote 2 al freír a 170°C se incrementó en 13 veces el contenido de acrilamida en las hojuelas pretratadas y en 22 veces en las hojuelas sin pretratamiento, con respecto a sus pares del lote 1. Lo anterior sugiere que el contenido de azúcares reductores generados por hidrólisis del almidón, determina el grado de formación de acrilamida en las hojuelas de papa fritas.

En la Figura 11 se presenta la relación entre el contenido final de asparragina y la acrilamida formada.

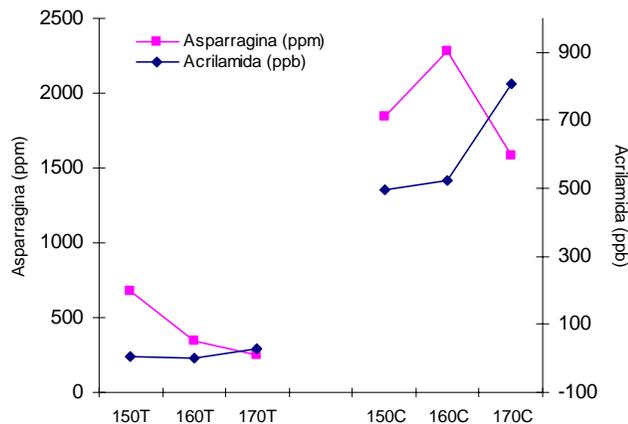


Figura 11. Relación entre el contenido de asparragina y la formación de acrilamida en el producto final.

Se comprobó con esto que la reducción del contenido de acrilamida debido a la reducción de la asparragina a causa de la aplicación de los pretratamientos de escaldado e inmersión en solución de ácido cítrico es posible; lo anterior complementa parcialmente lo anunciado por

Wicklund *et al.* (2006) quienes dieron relevancia a los azúcares reductores. La presencia de los dos precursores es fundamental en la reacción de síntesis de acrilamida.

Análisis estadístico del diseño

Se obtuvo un coeficiente de variabilidad de 108,66% y una desviación estándar de 212,71, lo que sugiere la alta variabilidad de los resultados obtenidos, lo que es lógico ya que los tratamientos control presentan un contenido de acrilamida mas alto que los pretratados.

Cuadro 6. Análisis de varianza – Tipo III para contenido de acrilamida

Fuente	SC	gl	CM	F - value	<i>p-value</i>
Lote	198870,96	1	198870,96		
A-Pretratamiento	329744,49	1	329744,49	7,29	0.0428 significativo
B-Temperatura	21637,02	1	21637,02	0,48	0.5200
AB-Interacción	457,21	1	457,21	0,01	0.9238
Residuo	594859,36	5	118971,87		
Total	793730,32	9			

Mediante el análisis de varianza del Cuadro 6, se corroboró la existencia de diferencias estadísticamente significativas ($\alpha < 0,05$) entre los tratamientos con aplicación de escaldado e inmersión y los tratamientos control, pero no entre las temperaturas ni en la interacción entre los tratamientos y las temperaturas de fritura.

Al optimizar el diseño factorial, se obtuvo la siguiente solución que cumple con las condiciones de optimización, que son, considerar una temperatura comprendida entre el rango trabajado [150°C – 170°C], considerar tanto las muestras con pretratamiento como las muestras control sin pretratamiento y la minimización del contenido de acrilamida a un contenido final de 2 $\mu\text{g kg}^{-1}$, correspondiente al límite de detección por parte de detector MS/MS. Los resultados se muestran a continuación:

Solución del modelo planteado para minimizar el contenido de acrilamida:

Pretratamiento: Con aplicación de los pretratamientos
 Temperatura: 165°C
 Contenido esperado de acrilamida: 2,26 µg kg⁻¹

El modelo plantea que al freir hojuelas de papas a una temperatura de 165°C, bajo las mismas condiciones de tiempo de fritura que garantice un contenido de humedad aproximado de 2,0%, utilizando las mismas condiciones de aceite y pretratamientos, se espera un contenido de acrilamida de 2,26 µg kg⁻¹, para esta materia prima.

Cabe mencionar que estos parámetros de fritura deben ser acordes a los respuestas óptimas obtenidas de las evaluaciones sensoriales, tanto en el panel entrenado como no entrenado.

Evaluación Sensorial

Método descriptivo para evaluación de la calidad de hojuelas de papas fritas

En el Cuadro 7, se presenta el Test de comparación múltiple de Tukey entre los diferentes tratamientos de hojuelas de papas fritas.

Cuadro 7. Test de comparación múltiple de Tukey para hojuelas de papas fritas

	Color	Pardeamiento	Transparencia	Crocancia	Dureza	Sabor extraño	Aceitosidad
CC	7,84 ± 2,5 b	6,51 ± 3,9 a	4,28 ± 3,7 a	10,03 ± 2,3 a	3,45 ± 2,6 a	3,80 ± 4,3 ab	6,35 ± 3,7 a
150T	4,09 ± 2,1 a	5,53 ± 4,0 a	6,74 ± 3,5 ab	9,30 ± 3,4 a	10,38 ± 1,8 d	5,11 ± 3,8 b	6,68 ± 3,1 a
150C	9,81 ± 2,7 b	2,88 ± 2,5 a	4,89 ± 3,6 a	9,19 ± 2,9 a	5,99 ± 2,5 ab	1,17 ± 2,0 a	7,11 ± 3,1 a
160T	3,74 ± 2,5 a	3,63 ± 3,7 a	7,48 ± 4,3 ab	8,42 ± 2,6 a	8,17 ± 2,7 bcd	3,34 ± 3,6 ab	6,72 ± 2,7 a
160C	9,78 ± 2,2 b	4,35 ± 4,5 a	6,77 ± 3,6 ab	9,71 ± 2,5 a	8,60 ± 3,1 bcd	2,05 ± 2,7 ab	8,02 ± 3,5 a
170T	3,69 ± 2,5 a	4,74 ± 4,7 a	8,53 ± 4,1 b	9,64 ± 2,4 a	8,91 ± 3,7 cd	4,43 ± 4,0 ab	8,24 ± 3,6 a
170C	9,97 ± 2,1 b	5,49 ± 4,1 a	5,15 ± 3,2 ab	9,98 ± 2,6 a	6,77 ± 3,6 bc	3,34 ± 3,6 ab	7,85 ± 2,5 a

Los valores son promedios ± SD (n=16). Los promedios en una misma columna con diferente letra difieren significativamente ($p < 0,05$). Cifras en azul, son las de mejor calidad o intensidad del atributo; cifras en rojo, son las de menor calidad o intensidad del atributo. CC, control comercial.

Los valores presentados corresponden a los promedios entre los dos lotes evaluados por separado, en distinta fecha, posterior a la elaboración de cada uno.

Se presentaron diferencias significativas entre los siguientes parámetros de calidad:

- **Color amarillo (intensidad de color amarillo en la superficie de la hojuela) y Pardeamiento (presencia de color marrón en la superficie y bordes de la hojuela):**

El control comercial de la marca Lay`s fue el mejor evaluado desde el punto de vista sensorial y los tratamientos control no presentaron diferencias significativas con respecto a la muestra comercial ni entre ellos, aunque su color amarillo fue mas intenso. Jung *et al.* (2003) mencionaron que el ácido cítrico no influye en el color del producto. Esta observación no puede ser confirmada en este informe, ya que la concentración de ácido cítrico empleada en la inmersión, redujo notablemente la intensidad del color amarillo y el nivel de pardeamiento. Lo anterior se muestra en la Figura 12.

En cuanto a la intensidad del color, las muestras sometidas a pretratamientos no presentaron diferencias significativas entre ellas, lo mismo se observa entre los controles, lo que afirma que los pretratamientos afectaron la generación de productos propios de la reacción de Maillard que dan color pardo a las papas, por nombrar algunos, las melanoidinas y algunos compuestos heterocíclicos (Low *et al.*, 2006). El prelavado y el escaldado redujeron considerablemente el contenido de azúcares reductores y la inmersión en solución ácida redujo el contenido de asparragina, por lo que se limitó la formación de la base de Schiff, etapa inicial del pardeamiento no enzimático. Aunque el parámetro pardeamiento no presentó diferencias estadísticamente significativas, la diferencia en los promedios señala que si existe una variabilidad en la presencia de zonas color marrón sobre la papa.

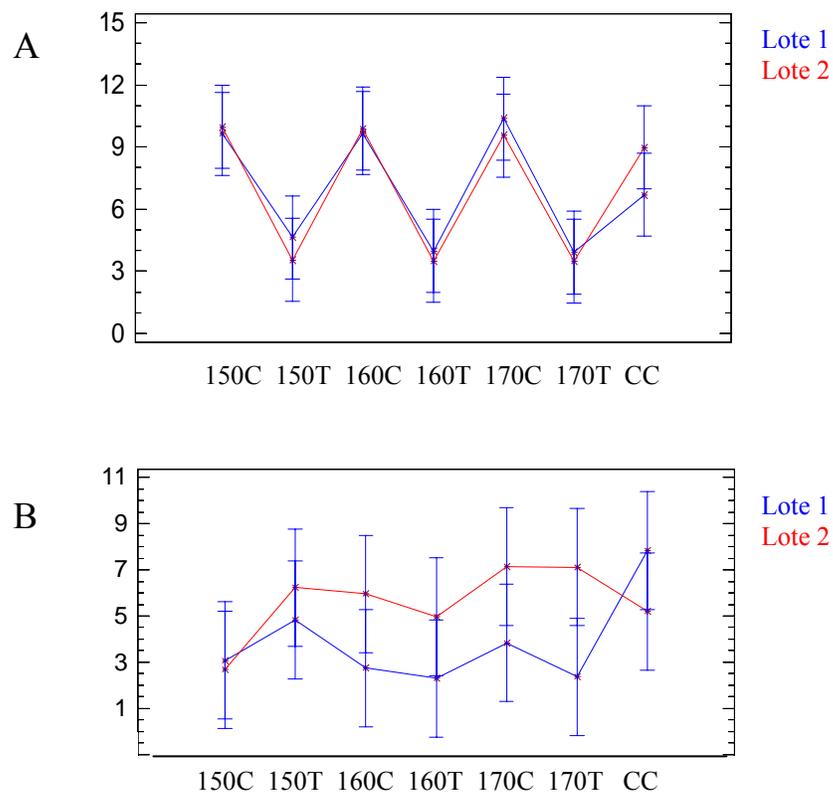


Figura 12. Comportamiento de los parámetros de Color (A) y Pardeamiento (B) en la evaluación de calidad de hojuelas de papas fritas. El eje Y corresponde a la evaluación por parte del juez según la pauta (anexo 2).

De acuerdo con Pedreschi *et al.*, (2005), el escaldado redujo el valor a^* (parámetro cromático rojizo) de las hojuelas de papas fritas, debido a la lixiviación de los azúcares reductores antes de la fritura, inhibiendo en este procedimiento, el pardeamiento no enzimático y conduciendo a hojuelas de papas claras y menos pardas.

Sin embargo, los resultados obtenidos no coincidieron totalmente con lo anterior, puesto que después de retirar las hojuelas de papas de la solución de ácido cítrico, estas mostraron inicialmente un color gris azulado debido posiblemente a la formación de un complejo ácido clorogénico - ión-ferroso reducido descolorido en la papa. El complejo

ferroso entonces se oxidó a un complejo férrico oscuro después de la exposición al oxígeno en el aire. Lo anterior es muy común en las papas sometidas a cocción en agua o en vapor, seguido de exposición al aire (Friedman, 1997).

Posteriormente, se presentaron zonas pardeadas en su superficie; es posible que se hayan generado reacciones de pardeamiento de tipo enzimático, aunque es de suponerse que el pretratamiento de escaldado inactivó la actividad de las polifenoloxidasas (PPO) propias de la matriz de la papa.

Según Gama-Baumgartner *et al.* (2003), el área de dichas regiones pardeadas disminuyó al aumentar el tiempo de inmersión e incluso, después de haber estado 1 hora, las hojuelas no presentaron dicho pardeamiento. También encontraron que existe un valor intermedio de concentración de ácido cítrico que permite definir el grado de pardeamiento óptimo, ya que ellos demostraron que modestas concentraciones de dicho ácido (< 4%), redujeron claramente el pardeamiento, mientras que se realizó cuando se aplicó en altas concentraciones (10%).

Se sugiere plantear en un proyecto futuro, un diseño experimental que permita determinar la concentración adecuada de ácido cítrico en solución y el tiempo de inmersión, así mismo, estudiar la actividad enzimática propia de la papa.

Además, surge entonces la necesidad de aclarar a través de la investigación, el origen químico de aquellas áreas pardeadas, ya que no es completamente atribuible este efecto al ácido cítrico; este es empleado como efectivo agente inhibidor de la enzima PPO la cual cataliza las reacciones de pardeamiento en frutas y vegetales incluida la papa (Friedman, 1997).

- **Transparencia (presencia de zonas translucidas en la hojuela):** el tratamiento 160TA resultó ser el mejor evaluado, pero la mayoría de los demás tratamientos están entre el rango de intensidad del atributo de muy suave o muy bajo a intensidad alta; por

lo anterior, se puede decir que la transparencia vista como un indicador de la cantidad de aceite absorbido por la hojuela de papa durante la fritura, se mantuvo generalmente en niveles intermedios de la escala (cerca de 7,0, determinado previamente como nivel óptimo), exceptuando la muestra comercial, quizás por su grosor, genera la menor transparencia a la vista. La Figura 13 muestra el comportamiento de este atributo de calidad. Los tratamientos del lote 2 muestran una mayor transparencia que los tratamientos del lote 1. Siendo todas las condiciones del proceso las mismas, este resultado pudo deberse a la relación Materia Seca – Agua de la hojuela de papa al momento de freírse y también a la desuniformidad del corte por desgaste de la cuchilla.

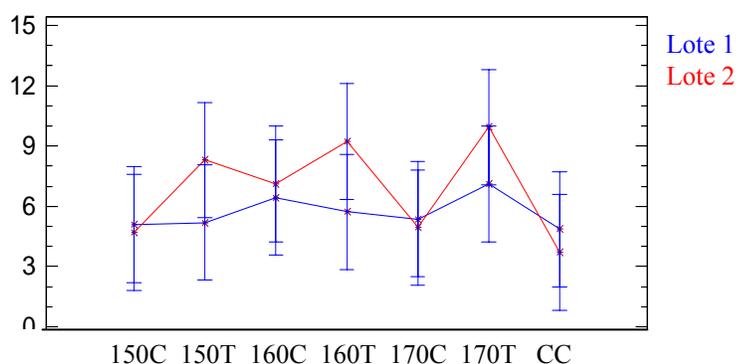


Figura 13. Comportamiento del parámetro de Transparencia en la evaluación de calidad de hojuelas de papas fritas.

- Dureza (grado de fuerza necesario para romper la hojuela al masticar):** el óptimo para este atributo tiende a los valores medios de la escala, siendo el tratamiento 160T el mejor evaluado. Este parámetro resulta ser el de mayor importancia para determinar la calidad de una hojuela de papa frita. Tanto el control comercial como la muestra 150T resultaron ser la menos dura y la más dura respectivamente. Los tratamientos del lote 2 presentan valores más altos que el lote 1 (Figura 14), posiblemente debido al incremento de la materia seca durante la maduración de la papa (De Wilde *et al*, 2006). Generalmente resultaron más duros los tratamientos con aplicación de escaldado e inmersión, y si bien es cierto que el primer pretratamiento eliminó por lixiviación

azúcares reductores, entonces el ácido cítrico actúa sobre la matriz restante de la papa: hidratos de carbono estructurales y pectinas y que, de acuerdo con Hoff y Castro (1969), estos polisacáridos son la estructura básica de la pared celular libre de almidón en la papa. Lo anterior sugeriría la posible interacción entre el ácido cítrico y las pectinas o compuestos pépticos de la papa, generando una mayor dureza entre las papas fritas.

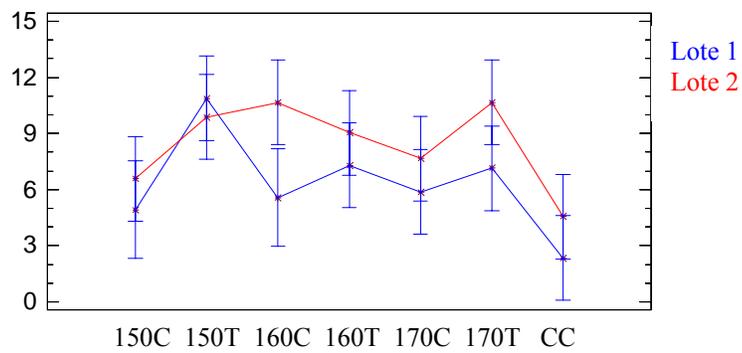


Figura 14. Comportamiento del parámetro de Dureza en la evaluación de calidad de hojuelas de papas fritas.

- Sabor extraño (sabor diferente al de una hojuela de papa de tipo comercial):** este sabor extraño hizo referencia a un posible umbral de acidez captado por el panel; se trató de conseguir que las hojuelas sometidas a tratamientos de inmersión en ácido cítrico, no quedaran con un dejo de gusto ácido, para que fueran igualmente competitivas con los controles. Todos los promedios están en el rango entre “ausencia” y “suave o bajo” (Figura 15). Por lo anterior, se estimó previamente el óptimo para este atributo en los valores más bajos de la escala, y por consiguiente, el tratamiento mejor evaluado fue el 150C, lo que es completamente lógico. A esta temperatura de fritura, la transferencia de calor no fue tan agresiva como si sucedió a temperaturas más altas, logrando que no se pardeara el producto y que los aromas y sabores generados fueran normales tendiendo a leves.

En concordancia con Low *et al.* (2006), la generación de sabores extraños, muy ligados al aroma, estuvo influenciada por la adición de ácido cítrico, la cual pareció incrementar la producción neta de los aldehídos de Strecker, en la relación a los tratamientos control. El descenso del pH influyó en limitar la degradación de dichos aldehídos, frecuente en los estados finales de la reacción de Maillard a altas temperaturas. Por otra parte, el tiempo de inmersión de una hora también fue suficiente para el desarrollo de alkilpirazinas, las cuales intervienen en el aroma y sabor.

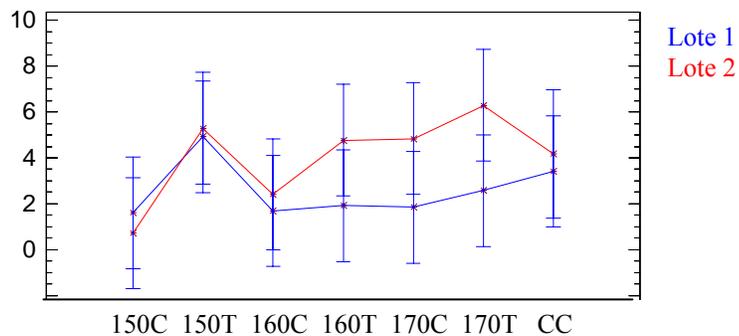


Figura 15. Comportamiento del parámetro de Presencia de Sabor Extraño en la evaluación de calidad de hojuelas de papas fritas.

No presentaron diferencias significativas los atributos de:

- Aceitosidad en boca
- Crocancia

Por lo tanto, se favoreció la competitividad de los tratamientos con respecto al control comercial. Se dedujo entonces la conveniencia que el panel no discriminara la aceitosidad en boca y que igualara la crocancia con el control comercial.

Diferencias entre tratamientos en función del lote de fritura

La interacción entre el efecto Lote y el efecto Tratamiento (Cuadro 8) surgió a raíz de las diferencias existentes entre los tratamientos, posiblemente originadas por el deterioro fisiológico propio de la papa, el efecto del endulzamiento debido a la hidrólisis del almidón de reserva nativo y la actividad acuosa. La síntesis de azúcares simples tiene efecto directo en los atributos de color y pardeamiento, esencialmente.

Cuadro 8. *p* – *value* de la interacción Lote – Tratamiento para cada atributo de calidad.

Atributo	<i>p</i> - <i>value</i>
Color	0,514
Pardeamiento	0,061
Transparencia	0,211
Crocancia	0,971
Dureza	0,124
Sabor extraño	0,377
Aceitosidad	0,450

Es claro notar que no existió un efecto estadísticamente significativo ($\alpha < 0,05$) en los tratamientos aplicados, en función de las características propias de la materia prima nativa con que se elaboran las hojuelas de papas en cada lote; en el atributo pardeamiento se evidenció el valor más cercano a la significancia.

Las hojuelas de papas del segundo lote de fritura pardearon significativamente más que las del primer lote de fritura, debido al aumento de azúcares simples reactantes en la reacción de Maillard.

Análisis sensorial de aceptabilidad de hojuelas de papas fritas

Esta evaluación permitió conocer de primera mano, la reacción de consumidor final de las papas fritas. En el Cuadro 9 se presenta el análisis de varianza respectivo. Los valores presentados corresponden a los promedios de los dos lotes.

Cuadro 9. Análisis de varianza para aceptabilidad de hojuelas de papas fritas.

Fuente	SC	gl	CM	F - value	<i>p-value</i>
Tratamiento	642,91	6	107,15	44,38	0,00
Residuo	1673,20	696	2,41		
Total	2316,11	699			

Se observó que los tratamientos son significativamente diferentes. Ahora, para conocer entre cuales tratamientos existió dicha diferencia, se realizó el Test de comparación múltiple de Tukey HSD 95% (Cuadro 10).

Cuadro 10. Test de comparación múltiple de Tukey para aceptabilidad de hojuelas de papas fritas.

	n	promedio	Grupos homogéneos
150T	100	2,09	a
150C	100	4,32	c
160T	100	2,94	b
160C	100	4,35	c
170T	100	2,88	b
170C	100	4,41	c
CC	100	4,83	c

Estadísticamente, se detallan tres grupos entre los cuales existe diferencia significativa para el parámetro aceptabilidad. El tratamiento menos aceptado corresponde al 150T, la que difiere de los tratamientos control y el control comercial.

Las muestras pretratadas son significativamente iguales, a excepción de la muestra 150T. En la Figura 16 se presenta el comportamiento de los promedios de aceptabilidad de los diferentes tratamientos, incluyendo el control comercial.

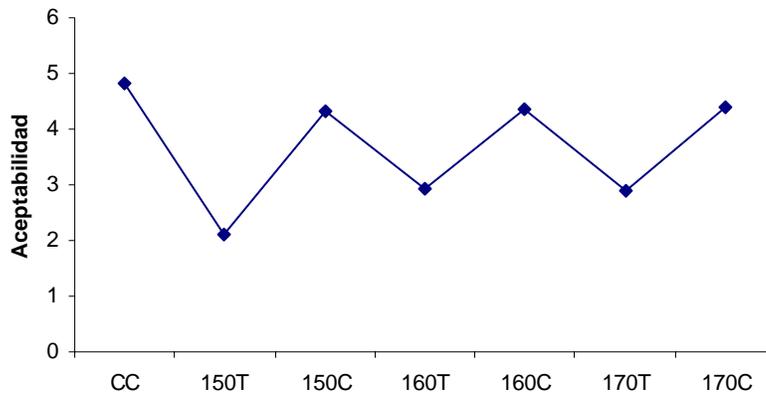


Figura 16. Promedios de aceptabilidad de hojuelas de papas fritas.

En la Figura 17 se detallan gráficamente los porcentajes de aceptabilidad de los distintos tratamientos.

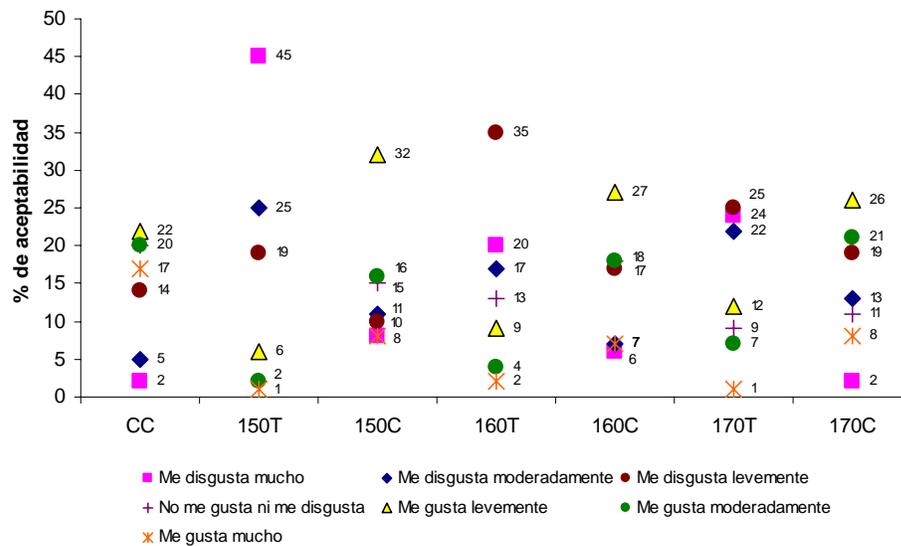


Figura 17. Porcentajes de aceptabilidad de hojuelas de papas fritas.

El control comercial, correspondiente a la muestra de marca Lay's Artesanal, fue la mejor aceptada por los consumidores, ya que obtuvo un promedio de aceptación de 4,83 donde el 22% de los consumidores dijo gustarle levemente, el 20% dijo no haberle gustado ni disgustado, el 20 % dijo haberle gustado moderadamente y el 17% dijo haberle gustado mucho.

Entre las muestras objeto de investigación, excluyendo el control comercial, la mejor aceptada por los consumidores fue la **170C** con un promedio de aceptación de 4,41% donde el 8% del panel dijo haberle gustado mucho y un 21% dijo haberle gustado moderadamente.

La muestra 150T fue la peor evaluada por lo consumidores, obtuvo un promedio de aceptación de 2,09 donde el 45% de los consumidores dijo disgustarle mucho y el 25% dijo haberle disgustado moderadamente. Las muestras que están evaluadas negativamente, pero en menor escala que la muestra 150T son las 160T y 170T, sin presentar diferencias significativas entre ellas.

Se pudo demostrar entonces que al someter las hojuelas de papas a los pretratamientos de escaldado en agua destilada a 90°C por 1 minuto, seguido de inmersión en la solución de ácido cítrico 0,25% por 1 hora, se alteró notablemente el grado de aceptabilidad por parte de un panel de consumidores. Estos pretratamientos afectaron los atributos considerados principales en cualquier evaluación sensorial de un producto alimenticio, como lo son, la apariencia, sabor y textura.

En términos generales, según el comportamiento de los promedios obtenidos, las muestras mejor evaluadas fueron los controles a las tres temperaturas (150C, 160C, 170C) y sus porcentajes de aceptación no presentaron diferencias significativas entre ellas; inclusive, son comparables e igualmente competitivas en cuanto a aceptabilidad, con la muestra comercial de Lay's.

CONCLUSIONES

La caracterización química de las papas variedad Panda, permitió conocer su composición de azúcares totales, azúcares reductores y asparragina principalmente, es decir, determinar la potencialidad de formación de acrilamida según la disponibilidad de sus precursores químicos.

La intervención tecnológica en el proceso de elaboración de hojuelas de papas fritas, con fines de reducir el contenido final de acrilamida, se logró mediante la aplicación complementaria y consecutiva de los pretratamientos de prelavado con agua destilada a temperatura ambiente por un minuto, escaldado en agua destilada a 90°C por un minuto e inmersión de las hojuelas en una solución de ácido cítrico 0,25% p/v durante una hora, a temperatura ambiente.

Las reducciones de acrilamida entre los diferentes tratamientos y entre lotes, fueron significativamente altas, obteniéndose valores comprendidos entre 85% y 99,5%, lo que se traduce en la efectividad de los pretratamientos aplicados.

La temperatura de fritura constituye el parámetro físico más importante, que incide en la formación de acrilamida en hojuelas de papas fritas, determinándose su formación acelerada a temperaturas más altas. Por esta razón se debe controlar la humedad inicial del producto como factor clave para regular la formación de este compuesto tóxico.

La optimización estadística del modelo planteado permitió definir los parámetros de proceso para obtener hojuelas de papas fritas con un contenido muy reducido de acrilamida; estas condiciones se ajustan en gran medida a los mejores resultados obtenidos en la evaluación sensorial.

LITERATURA CITADA

AOCS, Ai 2 75 (93).1993. Moisture and volatile matter. Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemist Society.

Becalski A, Lau BP, Lewis D, Seaman S. 2003. Acrylamide in foods: Occurrence, sources and modelling. *J. Agric. Food Chem.* 51: 802–808.

Cohen S and Michaud D. 1993. Synthesis of fluorescent derivatizing reagent, 6-aminoquinolyl-*N*-hydroxysuccinimidyl carbamate, and its application for the analysis of hydrolysate amino acids via high-performance liquid chromatography. *Analytical biochem.* 211: 279-287.

Corradini M and Peleg M. 2006. Linear and Non-Linear Kinetics in the Synthesis and Degradation of Acrylamide in Foods and Model Systems. *Critical reviews in food science and nutrition* 46: 489–517.

Costa LG, Deng H, Greggotti C, Manzo L, Faustman EM, Bergmark E, Calleman CJ. 1992. Comparative studies on the neuro and reproductive toxicity of acrylamide and its epoxide metabolite glycidamide in the rat. *Neurotoxicology* 13: 219–224.

Coughlin JR. 2003. Acrylamide: What we have learned so far. *Food Technology* 57(2): 100.

De Wilde T, De Meulenaer B, Mestdagh F, Govaert Y, Vandeburie S, Ooghe W, Fraselle S, Demeulemeester K, Peteghem CA, Calus A, Degroodt JM, y Verhe R, 2005. Influence of Storage Practices on Acrylamide Formation during Potato Frying. *J. Agric. Food Chem.* 53: 6550-6557.

De Wilde T, De Meulenaer B., Mestdagh F., Govaert Y, Vandeburie S, Ooghe W, Fraselle S, Demeulemeester K, Peteghem CA, Calus A, Degroodt JM, y Verhe R. Selection criteria for potato tubers to minimize acrylamide formation during frying. 2006. *J. Agric. Food Chem.* 54: 2199-2205.

Dearfield KL, Abernathy CO, Ottley MS, Brantner JH, Hayes PF. 1988. Acrylamide: Its metabolism, developmental and reproductive effects, genotoxicity, and carcinogenicity. *Mutation Research* 195: 45–77.

Dearfield KL, Douglas GR, Ehling UH, Moore MM, Sega GA, Brusick DJ. 1995. Acrylamide: A review of its genotoxicity and an assessment of heritable genetic risk. *Mutation Research* 330: 71–99.

Dunovská L, Hajšlová J, Čajka T, Holadová K, Hájková K. 2004. Changes of acrylamide levels in food products during technological processing. *Czech J. Food Sci.* 22, Special Issue, 283-286.

EEC, 1992, Commission Directive 92/39/EEC, 1992, amending Directive 90/128/EEC relating to plastics materials and articles intended to come into contact with foodstuffs. *Official Journal of the European Communities*, L168: 21-29.

EEC, 1998, Council Directive 98/83/EC of Nov 3 1998, on the quality of water intended for human consumption. *Official Journal of the European Communities*, L330: 32-54.

Ezeji T, Groberg M, Qureshi N, Blaschek H. 2003. Continuous production of butanol from starch-based packing peanuts. *Appl. Biochem. Biotechnol* 106: 375-382.

Friedman M. 1997. Chemistry, biochemistry and dietary role of potato polyphenols. A Review. *J. Agric. Food Chem.* 45: 1523-1540.

Gama-Baumgartner F, Grob K, Biedermann M. 2004. Citric acid to reduce acrylamide formation in French fries and roasted potatoes? *Mitt. Lebensm. Hyg.* 95: 110-117.

Gertz C, Klostermann S. 2002. Analysis of acrylamide and mechanisms of its formation in deep-fried products. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 104: 762–771.

Gertz C, Klostermann S, Kochhar P. 2003. Deep frying: the role of water from food being fried and acrylamide formation. *Oléagineux Corps Gras Lipides* 10(4): 297-303.

Gertz C. 2004. Optimising the baking and frying process using oil-improving agents. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 106: 736–745.

Godnic, M., 2002. Acrilamida en los alimentos. Disponible en: [Http://www.nutrinfo.com.ar](http://www.nutrinfo.com.ar). Visitado el 15 de diciembre de 2005.

Gökmen V, Palazoğlu T, Şenyuva H. 2006. Relation between the acrylamide formation and time–temperature history of surface and core regions of French fries. *Journal of Food Engineering* 77: 972–976.

Haase UN, Matthaus B, Vosmann K. 2003. Acrylamide formation in foodstuffs - Minimising strategies for potato crisps. *Deutsche Lebensm. Rund* 99(3): 87-90.

Hoff JE y Castro M. 1969. Chemical composition of potato cell wall. *J. Agric. Food Chem* 17(6): 1328-1331.

IARC. Acrylamide. In *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogen Risk to Humans: Some Industrial Chemicals*; International Agency for Research on Cancer: Lyon, France, 1994; Vol. 60: 389-433.

Ishihara K, Matsunaga A, Nakamura K, Sakuma K, Koga H. 2006. Examination of conditions inhibiting the formation of acrylamide in the model system of fried potato. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 70(7): 1616-1621.

JIFSAN/NCFST Workshop “Acrylamide in Food, scientific issues, uncertainties, and research strategies” 28–30th October 2002. Rosemont, USA. Disponible en www.jifsan.umd.edu/acrylamide/acrylamideworkshop.html.

Jung MY, Choi J, Ju JW. 2003. A novel technique for limitation of acrylamide formation in fries and baked corn crisps and in French fries. *Journal food science* 68(4): 1287-1290.

Kita A, Bråthen E, Knutsen S, Wicklund T. 2004. Effective ways of decreasing acrylamide content in potato crisps during processing. *J. Agric. Food Chem.* 52: 7011-7016.

Lopachin RM, Lehning EJ. 1994. Acrylamide induced distal axon degeneration. A proposed mechanism of action. *Neurotoxicology* 15: 247–260.

Low MY, Koutsidis G, Parker J, Elmore, Dodson A, Mottram D. 2006. Effect of citric acid and glycine addition on acrylamide and flavor in a potato model system. *J. Agric. Food Chem.* 52: 7011-7016.

Márquez-Ruiz G, Dobarganes MC. 1996. Short-chain fatty acid formation during thermo-oxidation and frying. *J Sci Food Agr.* 70: 120-6.

Martin F y Ames J. 2001. Formation of Strecker aldehydes and pyrazines in a fried potato model system. *J. Agric. Food Chem.* 49: 3885-3892.

Masson L, Romero N, Castro J, Robert P. 2005. Informe de avance proyecto HEATOX 506820. Wageningen, Holanda.

Masson L, Romero N, Castro J, Camilo C, Encina C, Hernández L, Muñoz J, Robert P. 2006. Informe de avance proyecto HEATOX 506820. Graz, Austria.

Matthäus B, Haase N, Vosmann K. 2004. Factors affecting the concentration of acrylamide during deep-fat frying of potatoes. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 106: 793–801.

Mestdagh F, De Meulenaer B, Van Peteghem C. 2007. Influence of oil degradation on the amounts of acrylamide generated in a model system and in French fries. *Food Chemistry* 100: 1153–1159

Mlotkiewicz JA. 1998. The Role of the Maillard Reaction in the Food Industry. In: O'Brien J et al. *The Maillard Reaction in Foods and Medicine*. Ed. The Royal Society of Chemistry. Cambridge, U.K. 19-27.

Morrison RT y Boyd RN. 1992. *Organic Chemistry*. 6^o edición. Benjamin Cummings. San Francisco. USA. 1360p.

Mottram DS, Wedzicha BL, Dodson AT. 2002. Acrylamide is formed in the Maillard reaction. *Nature* 419: 448–449.

Mucci LA., Dickman PW., Steineck G., Adami HO., Augustsson K. 2003. Dietary acrylamide and cancer of the large bowel, kidney and bladder: Absence of an association in a population based study in Sweden. *Br. J. Cancer* 88: 84-89.

Namiki M. 1988. Chemistry of Maillard reactions: Recent studies on the browning reaction mechanism and the development of antioxidants and mutagens. *Adv. Food Res.* 32: 115-84.

Ngadi M., Watts KC, Correia LR. 1997. Finite element method modelling transfer in chicken drum during deep fat frying. *Journal of food engineering* 32: 11-20.

Núñez H. 2001. Calidad en la producción de papas fritas. En: Hurtado ML. Presente y perspectivas de la industria de snacks en Chile. Publicaciones Misceláneas Agrícolas N° 50. Santiago, Chile. 41-48.

Olsson K, Svensson R, Roslund C. 2004. 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 Agriculture* 84: 447–458.

Osborne DR y Voogt P. 1986. Análisis de los nutrientes de los alimentos. Editorial Acribia. Zaragoza, España. 258p.

Pedreschi F, Kaack K, Granby K. 2004. Reduction of acrylamide formation in potato slices during frying. *LWT* 37: 679-685.

Pedreschi F, Moyano P, Kaack K, Granby K. 2005. Color changes and acrylamide formation in fried potato slices. *Food Research International* 38: 1-9.

Pelucchi C., Franceschi S., Levi F., Trichopoulos D., Bosetti C., Negri E., La-Vecchia C. 2003. Fried potatoes and human cancer. *Int. J. Cancer*, 105: 558-560.

Petersson E, Rosén J, Turner C, Danielsson R, Hellenäs K. 2006. Critical factors and pitfalls affecting the extraction of acrylamide from foods: An optimisation study. *Analytica Chimica Acta* 557: 287–295.

Rice JM. 2005. The carcinogenicity of acrylamide. *Mutation Research* 580: 3–20.

Rosén J, Hellenäs KE. 2002. Analysis of acrylamide in cooked foods by liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Analyst* 127: 880-882.

Rydberg P, Eriksson S, Tareke E, Karlsson P, Ehrenberg L, Törnqvist M. 2003. Investigations of factors that influence the acrylamide content of heated foodstuffs. *J. Agric. Food Chem.* 51: 7012-7018.

Smith EA, Pruen SL, Oehme FW. 1996. Environmental degradation of polyacrylamides. I. Effects of artificial environmental conditions: temperature, light and pH. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 35: 121-135.

Smith EA, Prues SL, Oehme FW. 1997. Environmental degradation of acrylamides. II. Effects of environmental (outdoor) exposure. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 37: 76-91.

Stadler RH, Blank I, Varga N, Robert F, Hau J, Guy PA, Robert MC, Riediker S. 2002. Acrylamide from Maillard reaction products. *Nature* 419: 449-450.

Stadler R, Robert F, Riediker S, Varga N, Davidek T, Devaud S, Goldmann T, Hau J, Blank I. 2004. In-Depth Mechanistic Study on the Formation of Acrylamide and Other Vinylogous Compounds by the Maillard Reaction. *J. Agric. Food Chem.* 52: 5550-5558.

Surdyk N, Roseän J, Andersson Roger, Aman Per. 2004. Effects of Asparagine, Fructose, and Baking. Conditions on Acrylamide Content in Yeast-Leavened Wheat Bread. *J. Agric. Food Chem.* 52: 2047-2051.

Taeymans D, Wood J, Ashby P, Blank I, Studer A, Stadler R, Gondé P, Van Eijck P, Lalljie S, Lingnert H, Lindblom M, Matissek R, Müller D, Tallmadge D, O'brien J, Thompson S, Silvani D, Whitmore T. 2004. A review of acrylamide: an industry perspective on research, analysis, formation, and control. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 44: 323-347.

Tareke E, Rydberg P, Karlsson P, Eriksson S, Törnqvist M. 2000. Acrylamide: A cooking carcinogen? *Chemistry Research Toxicology* 13: 517-522.

Tilson HA. 1981. The neurotoxicity of acrylamide: An overview. *Neurobehavioral Toxicol Teratol* 3: 445–461.

Umano K y Shibamoto T. 1987. Analisis of acrolein from heated cooking oils and beef fat. *J. Agric. Food Chem.* 35: 909-912.

Vitrac O., Trystram G., Rault-Wack A. 2000. Deep fat frying of food: heat and mass transfer, transformations and reactions inside the frying material. *Eur. J. Lipid Sc. Technol.* 102: 529-538.

Wagner R, Grosch W. 1998. Key odorants of French fries. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 75: 1385-1392.

WHO. 1985. Acrylamide. *Environmental Health Criteria* 49 (Geneva: World Health Organisation).

WHO, 1996, *Guidelines for Drinking-Water Quality*, 2nd edn (Geneva: World Health Organisation) 2: 940-949.

Wicklund T, Østlie H, Lothe O, Halvor S, Knutsen S, Bråthen E, Kita A. 2006. Acrylamide in potato crisp – the effect of raw material and processing. *LWT* 39: 571-575.

Williams J. 2005. Influence of variety and processing conditions on acrylamide levels in fried potato crisps. *Food Chemistry* 90: 875–881

Yailayan V, Wnorowski A, Perez Locas C. Why asparagine needs carbohydrates to generate acrylamide. 2003. *J. Agric. Food Chem.* 51: 1753-1757.

Yasuhara A, Tanaka Y, Hengel M, Shibamoto T. Gas chromatographic investigation of acrylamide formation in browning model systems. 2003. *J. Agric. Food Chem.* 51: 3999-4003.

Zyzak D, Sanders RA, Stojanovic M, Tallmadge DH, Ebehart L, Ewald DK, Gruber DC, Morsch TR, Strothers MA, Rizzi GP, Villagran MD. 2003. Acrylamide formation mechanism in heated foods. *J. Agric. Food Chem.* 51: 4782–4787.

ANEXOS**ANEXO 1****FICHA EVALUACION SENSORIAL DE ACEPTABILIDAD PARA HOJUELAS DE PAPAS FRITAS**

Nombre:..... Fecha:

Sírvase degustar las muestras que se presentan. Luego de su primera impresión general (color, sabor y textura) responda cuánto le agrada o desagrada el producto encerrando con un círculo el número al cual corresponde su calificación según la escala.

Muestra:.....

1	2	3	4	5	6	7
Me disgusta mucho	Me disgusta moderadamente	Me disgusta levemente	No me gusta ni me disgusta	Me gusta levemente	Me gusta moderadamente	Me gusta mucho

Muestra:.....

1	2	3	4	5	6	7
Me disgusta mucho	Me disgusta moderadamente	Me disgusta levemente	No me gusta ni me disgusta	Me gusta levemente	Me gusta moderadamente	Me gusta mucho

Muestra:.....

1	2	3	4	5	6	7
Me disgusta mucho	Me disgusta moderadamente	Me disgusta levemente	No me gusta ni me disgusta	Me gusta levemente	Me gusta moderadamente	Me gusta mucho

Muestra:.....

1	2	3	4	5	6	7
Me disgusta mucho	Me disgusta moderadamente	Me disgusta levemente	No me gusta ni me disgusta	Me gusta levemente	Me gusta moderadamente	Me gusta mucho

Muestra:.....

1	2	3	4	5	6	7
Me disgusta mucho	Me disgusta moderadamente	Me disgusta levemente	No me gusta ni me disgusta	Me gusta levemente	Me gusta moderadamente	Me gusta mucho

Muestra:.....

1	2	3	4	5	6	7
Me disgusta mucho	Me disgusta moderadamente	Me disgusta levemente	No me gusta ni me disgusta	Me gusta levemente	Me gusta moderadamente	Me gusta mucho

Muestra:.....

1	2	3	4	5	6	7
Me disgusta mucho	Me disgusta moderadamente	Me disgusta levemente	No me gusta ni me disgusta	Me gusta levemente	Me gusta moderadamente	Me gusta mucho

Observaciones: _____

MUCHAS GRACIAS

ANEXO 2

EVALUACION DE CALIDAD
HOJUELAS DE PAPAS FRITAS
(Pauta no estructurada)

Nombre..... Fecha..... Muestra.....

- Aquí hay una lista de parámetros sensoriales para describir las características de calidad de la hojuela de papa frita.
- Por favor, indique haciendo una **línea vertical** la intensidad de su sensación, para cada una de ellas.

Color amarillo: intensidad de color amarillo en la superficie de las hojuelas.

_____ |
Muy pálido intenso

Pardeamiento: presencia de color marrón en las hojuelas.

_____ |
Ninguno intenso

Transparencia: presencia de zonas translúcidas en la hojuela.

_____ |
Ninguna Intensa

Crocancia: grado de “crunch” o sonido pronunciado cuando es mordida la hojuela.

_____ |
Leve Intensa

Dureza: grado de fuerza necesario para romper la hojuela al masticar.

_____ |
Leve Intenso

Sabor extraño

_____ |
Ninguno Intenso

Aceitosidad

_____ |
Ninguna Intensa

MUCHAS GRACIAS

Observaciones:
