

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

VALPARAISO – CHILE



**“MICROPERFORACIÓN LASER-CO<sub>2</sub> DE PIEL DE TOMATE (*LYCOPERSICON ESCULENTUM*) ACOPLADO CON CAMPOS ELECTRICOS MODERADOS (CEM) EN EL PROCESO DE PELADO QUÍMICO: ANÁLISIS DE VARIABLES OPERACIONALES Y PARÁMETROS DE TEXTURA.”**

Natalia Inés Avendaño Muñoz

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVÍL QUÍMICO

Profesor Guía:  
Profesor Co-referente:

Dr. Ricardo Simpson Rivera  
Dr. Wladimir Silva Vera

Valparaíso, 2018

# Agradecimientos

Doy gracias a mi maestro José Rafael Estrada por sus enseñanzas y marcarme el camino durante toda la vida.

Doy gracias totales a mis padres Juan Carlos Avendaño y Sandra Muñoz, por su amor y apoyo incondicional, por ser mis pilares fundamentales a quienes amo con todo el corazón! (mis soles junto a Jack)

No puedo dejar de olvidar a mi abuela Marta Aquea, quien es mi segunda madre y a quien adoro con todo mi ser.

A mis amigos durante la carrera, con quienes compartimos los mejores y peores momentos dentro de la universidad, chicos aperrados, cuya ayuda fue fundamental para poder llegar a cumplir esta meta tan larga.

Finalmente doy gracias a mis profesores del Departamento IQA del team de alimentos por su buena disposición, en especial al profesor Wladimir por su paciencia e incondicional apoyo para sacar este proyecto de título adelante.

## Resumen

En la actualidad el tomate (*Lycopersicon esculentum*) es uno de los commodities más consumidos a nivel mundial, siendo el 75% de estos consumidos de forma procesada en los países altamente industrializados. Antes de la elaboración de cualquier producto procesado, los tomates deben pasar por una etapa de pelado, es por ello que ésta corresponde a una de las operaciones unitarias más importantes en la industria y cruciales para maximizar la eficiencia de procesamiento y calidad del producto final. Dentro de los tipos de pelado tradicionales, el pelado con solución de NaOH (lejía) es el que provee de una mejor calidad de producto final, sin embargo, va acompañado un impacto ambiental negativo al emplear una soluciones de NaOH en altas concentraciones (8%-25%), generando efluentes de alto PH (>13) los cuales no se pueden verter al suelo y agua directamente, siendo necesario un post-tratamiento de neutralización. Con el fin de proponer una posible solución a esta problemática, el objetivo de esta investigación es la evaluación del efecto del uso combinado de micro-perforaciones Láser CO<sub>2</sub> y Campos Eléctricos Moderados como tecnologías de pre-tratamiento en el proceso de pelado químico de tomates, las cuales permitirían reducir el consumo de NaOH en el proceso de pelado químico. Los factores evaluados corresponden a concentración de solución de NaOH (0,1%-0,3%-0,5%), densidad de poro (1,99-3,90-8,59 [poros/cm<sup>2</sup>]) y diámetro de poro (128-194 [µm]). Las variables respuesta corresponden a los valores de Coeficiente de Difusión Efectivo (D<sub>eff</sub>) y de parámetros texturales (Trabajo, Máxima Carga y Módulo Elástico). Para ello, a muestras de piel de tomate de 1±0,5 [mm] se les aplicó un tratamiento químico en una celda de difusión, seguido de un proceso de indentación para la obtención de los parámetros de textura. Su efecto se evalúa contra el proceso de pelado tradicional y un control (piel de tomate sin pre-tratamientos). Se registran los valores de concentración de NaOH en el tiempo. Los resultados obtenidos para el D<sub>eff</sub> muestran que los 3 factores tuvieron efectos estadísticamente significativos (p<0,05). El valor del D<sub>eff</sub> aumentó de manera considerable al utilizar una concentración de 0,5% de NaOH, diámetro de poro de 194 [µm] y densidad de poro de 3,90 [poros/cm<sup>2</sup>]. En lo que se refiere al efecto del CEM, este no resultó ser significativo, por lo que se atribuye la mejora sustancial en el valor del D<sub>eff</sub> a las modificaciones superficiales de la piel de tomate. Los porcentajes de incremento en el valor del D<sub>eff</sub> respecto al control se encuentran en un rango entre el 0,2% y 143%, y se muestra una mejora de 2 órdenes de magnitud en comparación con valor estimado utilizando una concentración del 8% (empleadas a nivel industrial). Se destaca que el uso de un pre-tratamiento que involucre una mayor densidad de poro afecta el proceso de difusión, ya que el láser produce quemaduras en la superficie del tomate, dañando las áreas adyacentes a la perforación, lo cual desfavorece el proceso difusivo y además genera texturas más rígidas. Para los análisis de textura, se obtuvo que los parámetros significativos corresponden a la concentración de NaOH y diámetro de poro (p<0,05), obteniéndose texturas menos rígidas al trabajar a concentraciones del 0,3% y 0,5%, con un diámetro de poro de 194 [µm]. A nivel de textura, se evidencia una disminución de la rigidez del 80% respecto al control, mostrándose un efecto sinérgico entre ambos factores estudiados favoreciendo su potencial aplicación a nivel industrial. Los resultados indican la viabilidad de la tecnología láser CO<sub>2</sub> como pre-tratamiento en el proceso de pelado químico de tomates, al ofrecer grandes ventajas que se traducen en beneficios económicos, sanitarios y medio-ambientales al reducir sustancialmente las concentraciones de NaOH.

# Índice

Capítulo 1 : Antecedentes .....	8
1.1 Materia prima .....	8
1.1.1 Estructura del tomate .....	8
1.2 Métodos de pelado de tomates .....	9
1.2.1 Pelado con vapor y agua caliente.....	10
1.2.2 Pelado con solución de NaOH (lejía).....	10
1.3 Mecanismo de difusión en pelado de tomates con solución de lejía.....	11
1.4 Tecnologías de pre-tratamiento.....	14
1.4.1 Láser CO <sub>2</sub> .....	14
1.4.2 Campo Eléctrico Moderado .....	14
1.5 Textura .....	15
Capítulo 2 : Materiales y métodos.....	19
2.1 Diseño Experimental.....	19
2.1.1 Materias primas y reactivos .....	19
2.1.2 Preparación de las muestras de piel de tomate .....	19
2.1.3 Micro-perforaciones: .....	20
2.1.4 Aplicación de campo eléctrico moderado .....	20
2.1.5 Celda de difusión.....	21
2.2 Medición de Textura .....	22
2.3 Coeficiente de difusión efectivo.....	23
2.4 Diseño de experimentos .....	24
Capítulo 3 : Resultados y discusión.....	25
3.1 Micro-perforación Láser – CO <sub>2</sub> .....	25
3.2 Coeficiente de Difusión Efectivo.....	26

3.2.1 Resultados.....	27
3.2.2 Efecto del Campo Eléctrico Moderado en el $D_{eff}$ .....	30
3.2.3 Análisis de resultados .....	30
3.3 Textura .....	32
3.3.1 Trabajo .....	33
3.3.2 Módulo Elástico .....	34
3.3.3 Carga Máxima .....	35
3.3.4 Análisis de resultados para Textura .....	35
Capítulo 4 : Conclusiones .....	37
Anexos .....	43

# Introducción

El tomate (*Lycopersicon esculentum*) es sin duda uno de los commodities más consumido a nivel mundial, ubicados en ranking N°2 después de las papas (Agribenchmark, 2014). En los países altamente industrializados, tales como EEUU, el consumo de tomate procesado abarca cerca del 75%, (Ayvaz & Rodriguez-Saona, 2016) siendo algunos ejemplos; la salsa de tomate, tomates cortados en cubos; rodajas, ketchup y sopa de tomate.

El pelado es la primera operación unitaria que se realiza antes de la fabricación de cualquier producto procesado. Es un proceso crucial para maximizar la eficiencia del equipo de procesamiento y mejora en la calidad del producto final (Fellows, 2000). Dentro de los diversos métodos de pelado, el pelado químico con hidróxido de sodio (NaOH) es uno de los más comercialmente disponibles, debido a la eficiencia de pelado y mejor calidad del producto final (Pandrangui, 1998). El proceso de pelado químico involucra la exposición de los tomates a una solución de NaOH en concentraciones entre 8% y 25%, y temperaturas entre 60°C y 100 °C. Sin embargo, el proceso de pelado va acompañado de un impacto ambiental negativo, debido a la utilización de grandes volúmenes de hidróxido de sodio, generando efluentes con altos valores de pH ( $\text{pH} > 13$ ) y con la necesidad de un post-tratamiento de neutralización (Floros & Chinnan, 1990). Así, en función a las rigurosas leyes de protección ambiental, se han propuesto nuevas tecnologías de pelado que pretenden sustituir o mejorar los procesos tradicionales con el fin de poder solucionar radicalmente o generar un menor impacto ambiental.

Dentro de este contexto, la utilización de tecnologías nobles que busquen reemplazar las tecnologías convencionales de procesamiento aún se encuentra en etapa de experimentación, por lo que pretender su reemplazo hoy en día no sería comercialmente viable, haciendo necesario la búsqueda de técnicas que actúen de manera sinérgica con las técnicas convencionales, pero con un menor impacto ya sea sobre el producto y el medio ambiente. En este sentido, surge la alternativa de utilizar como pre-tratamientos el micro-perforaciones láser CO<sub>2</sub>, complementado con campos eléctricos moderados (CEM) para incrementar significativamente los fenómenos de transferencia durante el proceso de pelado químico convencional de tomate. La utilización de la tecnología láser CO<sub>2</sub> se justificaría porque los rayos son emitidos a una longitud de onda específica de 10,6  $\mu\text{m}$  y fuertemente absorbidos por el agua, lo que permite trabajar a nivel micro-estructural

generando la destrucción de la superficie en un sitio específico sin mayor daño en las áreas adyacentes (Bilanski & Ferraz, 1991). Por otro lado, la aplicación de CEM permitiría una permeabilización temporal de la membrana celular, con la consecuente facilitación en el transporte de sustancias a través de la estructura.

La hipótesis y objetivos de esta investigación corresponden a los siguientes:

### **Hipótesis**

La aplicación de micro-perforaciones Láser CO<sub>2</sub> y campos eléctricos moderados genera cambios a nivel micro-estructural en la piel de los tomates, lo cual acelerará el proceso de transferencia de materia, permitiendo reducir el consumo de NaOH en el proceso de pelado químico de tomate.

### **Objetivo General**

Estudiar el efecto a nivel micro-estructural de uso combinado de micro-perforaciones láser CO<sub>2</sub> y campos eléctricos (CEM) y su efecto en los procesos de transferencia de materia durante el proceso de pelado químico de tomates.

### **Objetivos Específicos**

1. Diseño y desarrollo de un estudio experimental utilizando el proceso tradicional de pelado químico de tomate como control.
2. Determinar el Coeficiente de Difusión Efectivo para investigar la potencial efectividad de la generación controlada de micro-perforaciones por medio de la tecnología Láser CO<sub>2</sub> en procesos de transferencia de materia.
3. Determinar el cambio en las propiedades mecánicas sobre la aplicación óptima de los pre-tratamientos combinados.
4. Aplicación de métodos estadísticos (Análisis de Varianza Multifactorial) para la identificación de los factores de mayor incidencia en el proceso de pelado químico de tomate con pre-tratamientos acoplados.

# Capítulo 1 : Antecedentes

## 1.1 Materia prima

El tomate (*Lycopersicon esculentum*) es uno de los vegetales más consumidos en el mundo. La importancia se atribuye a su versatilidad como cultivo y a sus altos contenidos de vitamina C, vitamina E, folatos, compuestos fenólicos, y otros carotenoides como  $\beta$ -caroteno (Beecher, 1998), los cuales juegan un rol importante en la prevención de enfermedades crónicas. Estos además son ricos en fitonutrientes que promueven la salud, tales como fenoles y flavonoides, siendo el licopeno el más abundante, atribuyéndolos a su fuerte actividad antioxidante (George, Kaur, Khurdiya, & Kapoor, 2004).

### 1.1.1 Estructura del tomate

Para un mejor entendimiento del proceso de pelado, es necesario conocer la anatomía del tomate. De modo general se distinguen partes:

**Pericarpio:** Consiste a la parte de la fruta que recubre la semilla, del cual se distinguen 3 capas: Exocarpio (la piel) la cual se puede dividir en una pared externa, paredes radiales y la pared interna (Columela); un Mesocarpio, correspondiente a una capa intermedia; y un Endocarpio, correspondiente a la capa más interna del pericarpio que rodean las semillas.

A la maduración, los diámetros de las células oscilan entre 100 y 500 micras (Ho & Hewitt, 1986).

Describiendo detalladamente la estructura externa, se tiene lo siguiente:

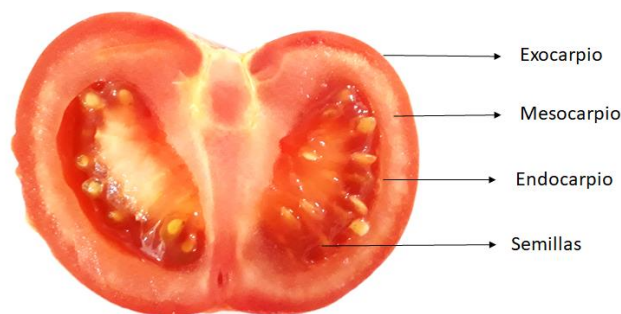
**Exocarpio:** Floros y Chinnan (1989) midieron el grosor de la piel (exocarpio) del tomate a ser  $50 \pm 5 \mu\text{m}$ . Este corresponde a la piel del tomate, el cual comprende una cantidad pequeña de células llamadas la capa epidérmica o epidermis, rodeadas por una delgada cutícula y de 2 a 4 capas de células hipodérmicas colénquimales (Ho & Hewitt, 1986). Esta está compuesta de Lamella, correspondiente a una sustancia que une las paredes celulares compuestas de celulosa y Hemicelulosa y Pectina. (Albert, Bray, Lewis, Raff, & Robert, 1983).

**Cutícula :** Corresponde a la capa protectora que interacciona con el medio ambiente, la cual se desarrolla en las plantas para evitar la pérdida incontrolada de humedad, además actúa como barrera protectora de los agentes externos e internos, ya sean químicos, físicos o biológicos. Con un espesor que varía de 4 a  $10 \mu\text{m}$  (Wilson & Sterling, 1976) la membrana

cuticular está compuesta de ceras y polisacáridos fibrosos depositados sobre una matriz cuticunosa, que le confiere las propiedades mecánicas para mantener y controlar el crecimiento de la planta (Hetzroni, Vana, & Mizrach, 2010).

**Las Ceras Epicuticulares e Intracuticulares:** Tienen como función principal evitar la pérdida de agua, la que puede deberse a que es un complejo poliéster con ceras asociadas de naturaleza hidrofóbica (Riederer, 2006) (Domínguez , Heredia-Guerrero, & Heredia, 2011). La influencia de las ceras en el proceso de transferencia de materia y procesos de pelado en tomates con solución de lejía, han sido demostrados experimentalmente por Das & Barringer, donde esta se demostró mediante un experimento de pelado, midiendo el rendimiento con y sin sus ceras. Al sacar sus ceras mediante disolventes orgánicos, se mejoró considerablemente la capacidad de pelado, ya que la inmersión previa redujo el espesor de la capa de cera cuticular y produjo grietas en la superficie de la cutina. El pelado después del pre-tratamiento produjo un 86% (temperaturas sobre 45°C) de tomates bien pelados en comparación con un 33% bien pelado en la serie de control (a temperatura ambiente de 16°C) (Das & Barringer, 2007).

A continuación en la Figura 1 se presenta la estructura del tomate:



*Figura 1: Estructura del tomate*

## 1.2 Métodos de pelado de tomates

El proceso de pelado convencional de tomate involucra una serie de procesos bioquímicos, térmicos y físicos para una adecuada remoción de la piel. Los mecanismos bioquímicos implican una desintegración de fracciones la cutina Hemicelulósica causando su agrietamiento y promoviendo la bioseparación entre el Endocarpio y Pericarpio, con la posterior separación de la piel (Rock, Yang, Goodrich-Schneider, & Feng, 2011).

Existe numerosas tecnologías que pretenden mejorar los procesos tradicionales de pelado de tomate, como el pelado por infrarrojos, vapor presurizado y enzimáticos, sin embargo, éstos no han sido comercializados debido a los altos costos de capital y problemas de viabilidad.

A continuación se describen los métodos de pelado más comúnmente comercializados:

### **1.2.1 Pelado con vapor y agua caliente**

Este tipo de pelado es el más común y económico usado en el procesamiento de tomates. Durante este proceso los tomates son tratados en un baño de agua caliente o vapor ( $T \geq 98$  °C, 15-60 s, 165-179 kPa) en una cámara presurizada (Rock, Yang, Goodrich-Schneider, & Feng, 2011). El tratamiento térmico causa la pérdida de la piel producto de la degradación de la pared celular, la disrupción celular y el colapso ocurrida en el nivel del Exocarpio, ya que las ceras de la cutícula cambian de un estado sólido a líquido (Floros & Chinnan, 1988) . Luego estos son rociados con agua fría para evitar el exceso de pelado (Smith & Hui, 2004) La ventaja de este método respecto al anterior es que es más seguro para el medioambiente. Este tipo de pelado tiene una recuperación significativamente alta, sin embargo, la calidad del producto final puede no ser tan buena. (Ayvaz & Rodriguez-Saona, 2016), ya que más del 25% de las frutas (medidos por el peso total) pueden perderse debido al sobre-pelado, siendo el rango óptimo del 7% al 10% (Barringer, Bennett, & Bash, 2008).

### **1.2.2 Pelado con solución de NaOH (lejía)**

En este proceso se utiliza una solución de hidróxido de sodio (NaOH) como pre-tratamiento a concentraciones entre 8% y 25% para des-polimerizar la capa externa de la piel del tomate, facilitando su separación (Shi & Le Maguer , 2000) la cual se realiza luego por métodos mecánicos como cepillos o goma discos, chorros de agua a alta presión, entre otros (Ayvaz & Rodriguez-Saona, 2016). El proceso consta de la inmersión de los tomates en una solución lejía caliente (60 a 100°C) por un tiempo dado (15 a 60 s) (Shi & Le Maguer , 2000). La solución disuelve las ceras de la cutícula rompiendo los enlaces  $\alpha$  1-4 en las unidades galacturónicas en pectina. Esto compromete la fuerte red de microfibrillas celulósicas, soportadas por las unidades de polisacáridos de la pectina, lo que resulta en la liberación de la piel del pericarpio (Rock, Yang, Goodrich-Schneider, & Feng, 2011).

Para entender el fenómeno difusivo, Floros & Chinnan (1989) propusieron un modelo para describir el fenómeno, calculando la difusividad de una solución de 2 M de NaOH a 72°C, resultando tener un valor de  $2,0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ , además, determinaron que concentraciones sobre 2 M (aprox. 8% de concentración de NaOH), la difusión se vuelve independiente de la concentración (Floros & Chinnan, 1990).

El uso de la solución de lejía se atribuye a muchos deterioros, costos ambientales y económicos debido a su disposición. En suelos salinos sódicos, los iones de sodio positivamente cargados de la lejía unen las partículas negativamente coloidales en el suelo, formando agregados, lo que inhibe el crecimiento de la planta debido a la falta de aireación, la baja permeabilidad al agua y el aumento del pH del suelo ( $\text{pH} > 13$ ). (Ondra & Ellis, 1998)

### **1.3 Mecanismo de difusión en pelado de tomates con solución de lejía**

La difusión del hidróxido de sodio, correspondiente al agente químico de pelado en tomates se puede caracterizar mediante la Segunda Ley de Fick, llamada también ecuación de difusión, la cual establece que la velocidad a la que el proceso procede en un punto del espacio para sistemas diluidos es proporcional a la variación de la pendiente de concentración del gradiente. La constante de proporcionalidad se define como coeficiente de difusión (Crank, 1980) e indica lo siguiente (Bird, Stewart, & N. Lightfoot, 2002):

$$\frac{dC}{dt} = D_{eff} \frac{d^2C}{dx^2} \quad [1]$$

Donde:

$C$  = es la concentración en dimensiones de [(cantidad de sustancia)  $\times$  longitud<sup>-3</sup>]

$t$  = tiempo [s]

$D_{eff}$  = es el coeficiente de difusión en dimensiones de [longitud<sup>2</sup>  $\times$  tiempo<sup>-1</sup>]

$X$  = es la posición [longitud]

La ecuación de difusión en fase fluida ha sido ampliamente aceptada y utilizada como un mecanismo predominante de transferencia de masa dentro de alimentos sólidos.

Mecanismos que no sean difusivos, como la presencia de poros o capilares en microestructura, pueden ser responsables del mecanismo de transferencia de materia en fase fluida. En este caso, dos fuerzas adicionales para incrementar la transferencia de masa a nivel microestructura son los gradientes de presión y fuerzas capilares (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2011).

En el caso del pelado químico de tomates, Floros & Chinnan aplicaron un método teórico para la obtención del coeficiente de difusión efectivo, aplicable para el estudio de mecanismos de difusión a través de la piel de frutas y vegetales.

*Desarrollo de la 2da ley de Fick:*

Se asume una difusión uniforme no estacionaria de Fick como se presenta en la Ecuación [ 1 ]

Para obtener las soluciones analíticas, se aplican las siguientes condiciones de borde aplicables a flujos a través de membranas (Floros & Chinnan, 1989):

- (a) Condiciones en la superficie exterior de la piel,  $C = C_1, x = 0, t \geq 0$
- (b) Condiciones en la superficie interna de la piel,  $C = 0, x = l, t \geq 0$
- (c) Condiciones iniciales,  $C = 0, 0 < x < l, t \geq 0$

En donde  $C_1$  corresponde la concentración inicial,  $l$  al grosor de la piel.

Usando transformadas de Laplace para resolver la Ecuación [ 1 ], la velocidad de flujo a través de la membrana viene dada por:

$$\frac{dC}{dt} = 2C_1 \left( \frac{D_{eff}}{\pi t} \right)^{\frac{1}{2}} \sum_{m=0}^{\infty} \exp \left[ -(2m + 1)^2 \left( \frac{l^2}{4} D_{eff} t \right) \right] \quad [ 2 ]$$

La serie para valores pequeños de  $t$  converge rápidamente debido a su posición en términos exponenciales (Rogerts, Buritz & Alpert, 1954). Considerando el primer término de la serie exponencial y multiplicando ambos lados por  $t^{1/2}$  y aplicando logaritmo a ambos lados se obtiene lo siguiente:

$$\ln\left(t^{\frac{1}{2}}\frac{dC}{dt}\right) = \ln\left[2C_1\left(\frac{D_{eff}}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}\right] - \frac{l^2}{4D_{eff}}\frac{1}{t} \quad [3]$$

Al graficar la cantidad en el lado izquierdo versus el recíproco del tiempo, se obtiene

$$L = -\frac{l^2}{4D_{eff}} \quad [4]$$

De esta forma puede ser calculado el coeficiente de difusión efectivo  $D_{eff}$ , el cual se considera constante para un proceso isotérmico.

Cabe destacar que se han desarrollado modelos para procesos de pelado con tratamiento químico en alimento de geometría esférica ( Barreiro, Sandoval, Rivas, & Rinaldi, 2007), con el fin de predecir los tiempos de pelado, pérdidas de masa y cambios de textura, que relacionan diferentes rangos de concentración de NaOH, temperaturas de pelado y textura del producto final. La ecuación propuesta para el tiempo de pelado corresponde a la siguiente:

$$t = b \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) ((R_e - r)/C_a) \quad [5]$$

Donde t es el tiempo de pelado (min), b es una constante (g mol/min cm<sup>4</sup>),  $E_a$  es la energía de activación para el pelado químico (cal/g mol), R la constante universal de los gases, T la temperatura de pelado (K),  $R_e$  el radio externo de la fruta antes del pelado (cm), r el radio del producto en cualquier momento durante el pelado químico (cm), y  $C_a$  la concentración del alcalí (g/100 ml).

Su estudio resulta interesante para su aplicación en el caso de pelado químico de tomate utilizando la fruta entera, sin embargo, para efectos de la investigación, se aplicará el modelo utilizado por Floros & Chinnan para difusión a través de piel de frutas y vegetales, con el fin de evaluar el efecto de los pre-tratamientos sobre el valor del  $D_{eff}$  en el proceso de pelado químico de tomate.

## **1.4 Tecnologías de pre-tratamiento**

### **1.4.1 Láser CO<sub>2</sub>**

Los láser (luz amplificada por emisión estimulada de radiación) generan haces de luz monocromática, coherente y en una dirección, que suele estar colimado en pequeños puntos, permitiendo una destrucción de alta precisión, sin alterar excesivamente las áreas adyacentes (Tanzi, Lupton, & Alster, 2003) (Ferraz, Carlos, Mittal, & Bilanski, 2007).

Para uso de tecnologías que afectan a nivel micro-estructural, es necesaria una intervención a nivel microscópico, ya que la mayor parte de los elementos que participan críticamente en las propiedades de transporte, físicas y comportamientos reológicos, rasgos estructurales y sensoriales de los alimentos están por debajo del rango de los 100  $\mu\text{m}$ . (Aguilera J. , 2004). Es por ello que entre los diversos tipos del láser, los de CO<sub>2</sub> se consideran los más apropiados para tratar matrices biológicas, ya que los rayos emitidos a una longitud de onda específica de 10,6  $\mu\text{m}$  son fuertemente absorbidos por agua (Bilanski & Ferraz, 1991).

Esta tecnología ha permitido mejora de variados procesos de materiales, dado su alto grado de precisión, velocidad, seguridad y cuidado ambiental. Su incorporación a la industria no se ha completado. Las primeras aplicaciones experimentales de rayos láser CO<sub>2</sub> en la industria alimentaria en pelado de papas fueron realizadas por Bilanski y Ferraz en 1991. Otros usos de esta tecnología son el grabado de alimentos en su superficie y envasado (Sood , Ference , Narciso, & Etxeberria , 2009). Otra aplicación de estos en los procesos de deshidratación osmótica, fue aplicar perforaciones con láser sobre la piel de arándanos congelados como una nueva forma de pre-tratamiento que permita una rápida infusión de azúcar en la fruta, la que resultó ser viable, presentando una mejora notable en el rendimiento final, la calidad del producto y la eficiencia del proceso (Fujimaru, Ling, & Morrissey, 2012). En este caso, el láser produjo micro-perforaciones poco invasivas para la estructura celular de la fruta, creando vías para la incorporación de solutos del medio de solución osmótica y aliviando la acumulación de presión en el material.

### **1.4.2 Campo Eléctrico Moderado**

El Campo Eléctrico Moderado corresponde a un proceso de permeabilización temporal de las células membranosas a temperaturas menores a las cuales las membranas son permeabilizadas bajo efectos térmicos, en un fenómeno conocido como

electroporación (Lima & Sastry, 1999). Este involucra la aplicación de campos eléctricos con valores menores o iguales a 1000 V/m con o sin calentamiento, los cuales son valores muy bajos para caer en un campo eléctrico pulsado ( el cual se utiliza intensidades de campo mayores) o producir un calentamiento óhmico, el cual produce el calentamiento de materiales a través del paso de corrientes eléctrica. (Sastry, 2008)

La aplicación de un campo eléctrico por periodos prolongados de tiempo causa el rompimiento de las paredes de células epidérmicas e hipodérmicas en el Exocarpio, lo que interfiere en el proceso de pelado. Antecedentes del efecto de corrientes eléctricas sobre el proceso de pelado con tomate corresponden a los estudios realizados por Wongsangasri y Sastry, (2016b) los cuales propusieron el uso del calentamiento óhmico como alternativa para mejorar la difusión de la solución de pelado mediante un fenómeno de electroporación producida durante el tratamiento, utilizando cloruro de sodio (NaCl) a diferentes condiciones. En la etapa inicial del calentamiento óhmico, se espera que las ceras del tomate actúen como una barrera que provoque resistencia al paso de la corriente a través del tomate, sin embargo, una vez la temperatura alcance el rango de los 45 °C, las ceras se disuelven permitiendo el contacto entre la cutícula y el medio, además permitiendo el traspaso de la corriente eléctrica .Las propuestas fueron aplicar mezclas de NaCl/NaOH o NaCl/KOH con calentamiento óhmico acoplado. Las concentraciones de NaOH utilizadas se encuentran en el rango de 0,1% al 0,5%, obteniéndose una calidad de pelado aceptable (pérdida de peso menor al 11,3%) aplicando campos eléctricos por un tiempo aproximado de 600 s, utilizando valores de campo entre 300-6000 V/m .Los autores concluyeron que las difusividades para pelar con lejía a 65°C usando calentamiento óhmico ( $5 \times 10^{-10} m^2 / s$ ) eran más altas que aquellas sin tratamiento óhmico ( $2.0 \times 10^{-12} m^2 / s$ ) (Wongsangasri & Sastry, 2016b)

## 1.5 Textura

### *Propiedades mecánicas y textura*

La medición de las propiedades mecánicas proporciona una mejor comprensión del efecto de los tratamientos sobre el producto a nivel de textura. Esta es necesaria para la determinación de la calidad, el modelado multi-escalar, el diseño del equipo y procesos a nivel industrial (Zhiguo Li, y otros, 2013).

Al consumir el alimento estamos detectando la textura, que también es afectada por las propiedades mecánicas. La textura en frutas se define generalmente como la sensación general que produce una fruta en la boca y, por lo tanto, está compuesta de características que pueden evaluarse mediante el tacto, como dureza, cohesión, viscosidad, elasticidad y adhesividad (Sams, 1999).

La prueba de compresión y las pruebas de penetración son los métodos más confiables para estimar la firmeza de la fruta. Los parámetros tales como elasticidad, carga máxima y trabajo se calculan a partir de las curvas de fuerza-distancia obtenidas en las pruebas. A continuación en la Figura 2 se muestra un ejemplo del perfil de deformación obtenido mediante prueba de compresión.

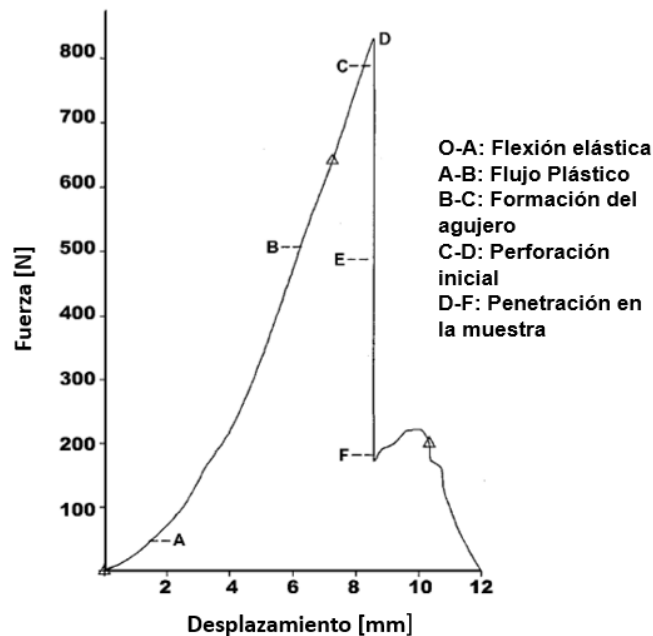


Figura 2: Comportamiento de un material en varias etapas en la indentación (Malik , Afzal Khan, Naeem, & ul Haq, 2003)

De esta curva se pueden obtener los siguientes parámetros:

**1) Trabajo Mecánico:** El trabajo mecánico es la cantidad de energía transferida por una fuerza. (Jammer, 1957). Durante una prueba de compresión, la fuerza cambia con la distancia, calculándose el trabajo como el área bajo la curva. Las unidades corresponden a [J]

**2) Carga máxima:** Se define como la fuerza máxima necesaria para penetrar en la fruta en profundidad constante (Nabil , Albaloushi, Mostafa , & Ayman , 2012). Ésta se mide en [N].

**2) La elasticidad:** Relacionado con la firmeza del producto, la elasticidad se define como la propiedad de un material por la que recupera su forma y dimensiones originales parcial o totalmente al cesar la acción del esfuerzo aplicado (Aguilera & Durán, 1996). Unos de los parámetros que la caracteriza es el Módulo de Young [ $N/m^2$ ], correspondiente a un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico según la dirección en que se aplique la fuerza (Malik , Afzal Khan, Naeem, & ul Haq, 2003).

A través de una prueba de indentación (efectuada con una bola) sobre la piel de frutas, y la obtención de la curva fuerza-distancia, se puede calcular el trabajo mecánico, y a partir de la Ecuación [ 5 ] obtener el Módulo de Young “E” (Malik , Afzal Khan, Naeem, & ul Haq, 2003).

$$W_e = \frac{3F^2 r_p^2}{\pi t_0^2 E \delta_s} (r_p^2 - r_d^2) (\delta_s - \delta_p) \quad [ 5 ]$$

Notación:

$W_e$  = Trabajo requerido para deformación después del de pasar por la posición del peak máximo de carga [J/m]

E =Módulo de Young de elasticidad [ $N/m^2$ ],

F= Fuerza Aplicada [N]

$t_0$  = Espesor inicial de la muestra [m]

$r_p$ = radio de la muestra contenida en la estructura de agarre [m]

$r_d$ = radio de la muestra en contacto directo con la sonda (bola) en el punto de carga máxima [m]

$\delta_s$ = desplazamiento de la bola en el deslizamiento [m]

$\delta_p$ =desplazamiento de la bola en la carga máxima [m]

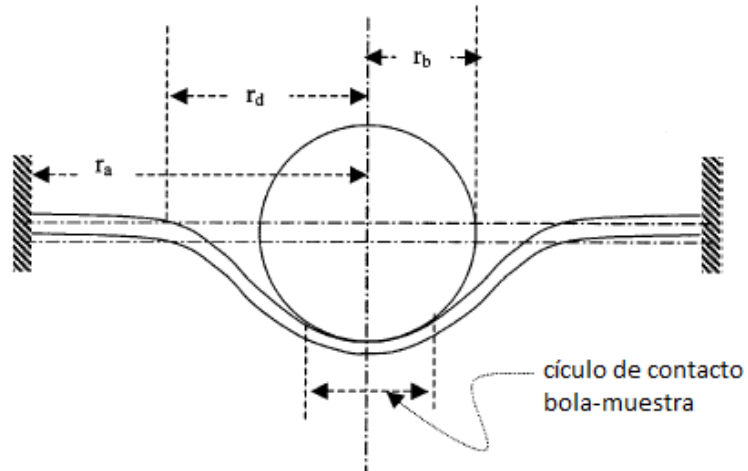


Figura 3: Boceto de los parámetros de la bola (Malik , Afzal Khan, Naeem, & ul Haq, 2003)

Según pruebas de compresión realizadas a la piel de tomate, el valor del módulo de elasticidad estaría alrededor de los  $1,826 \times 10^8$   $[N/m^2]$  (Bargel & Neinhuis , 2005) .

# Capítulo 2 : Materiales y métodos

## 2.1 Diseño Experimental

### 2.1.1 Materias primas y reactivos

La variedad de tomates utilizado fueron los “Larga vida”, obtenidas en el comercio local en Valparaíso. Estos fueron refrigerados a una temperatura de 2 °C, siendo el periodo máximo de refrigeración de 3 días.

La solución de lejía empleada para el experimento es preparada con agua destilada exenta de nitratos, obtenida del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la UTFSM; e hidróxido de sodio en lentejas de 98,6% de pureza, del proveedor G.A Ventas Chile.

### 2.1.2 Preparación de las muestras de piel de tomate

Las muestras fueron cortadas en forma cilíndrica con un diámetro de 4 cm, hasta un espesor de  $10,0 \pm 0,5$  mm (ver Figura 4) En estas condiciones se aplican las micro-perforaciones y campo eléctrico moderado. Una vez efectuado estos procedimientos, se remueve la pulpa cuidadosamente con bisturí hasta obtener un grosor de 0,5 – 1,5 mm para ser llevadas posteriormente al proceso de difusión.



*Figura 4: Muestras de forma cilíndrica*

### 2.1.3 Micro-perforaciones:

#### *Determinación del diámetro de poro*

Las micro-perforaciones se realizan con un láser de CO<sub>2</sub> SYNRAD TI100, el cual posee una longitud de onda de 10,6 μm (SYNRAD, 2017). Para determinar las condiciones de operación del láser CO<sub>2</sub> (potencia, número de pasos, tiempo de duración), se realiza pruebas a las muestras de piel de tomate a distintas configuraciones del láser, luego realizar la tinción de las muestras con azul de metileno para hacer visible el efecto de los micro-poros en la superficie de la muestra al momento de examinarlos través de un microscopio óptico.

Se utilizaron lentes de 125 mm y 370 mm de distancia focal para obtener distintos diámetros de poro. Mediante la potencia se regula la profundidad de la perforación.

La configuración elegida es aquella en que las micro-perforaciones no penetraran más allá de la cutícula del tomate, evitando la remoción de la pulpa.

A continuación en la Figura 5 se muestran las distribuciones de poro estudiadas:



*Figura 5: Distribución radial de poros*

### 2.1.4 Aplicación de campo eléctrico moderado

Dos placas circulares de acero inoxidable de 6 cm de diámetro fueron dispuestas en paralelo con una separación de 7,5 cm y conectadas a una Fuente Electromotriz (Voltac, SB-10). La disposición de las placas permite la aplicación de un campo eléctrico uniforme a toda la muestra. Se aplica un diferencial de voltaje de 10 V por un período de 600 (s) necesarios para producir el fenómeno de electroporación (Wongsa-Ngasri & Sastry, 2016b).

El campo eléctrico aplicado a todas las muestras estudiadas es de 1333 V/m. En la Figura 6 se muestra la configuración utilizada para aplicar el CEM:

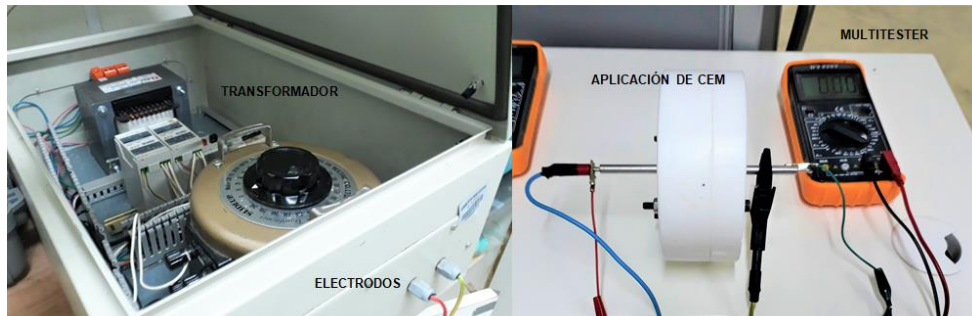


Figura 6: Equipo de campo eléctrico moderado CA.

### 2.1.5 Celda de difusión

La difusión de NaOH a través de la muestra de tomate fue evaluada a una temperatura de  $60 \pm 2$  °C constante bajo agitación a 600 rpm en ambos compartimentos de la cámara. El diseño de la celda se basa en el experimento realizado por Wongsan-Ngasri & Sastry (2016 b) y es representada en la Figura 7:

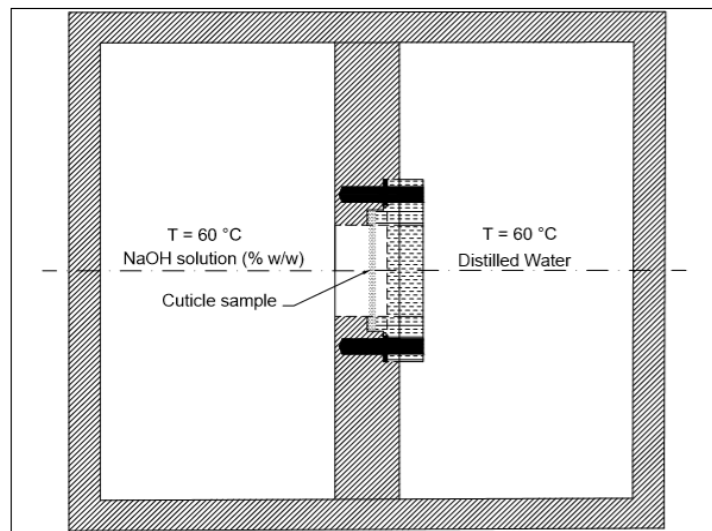


Figura 7: Celda de difusión

La celda consiste en dos reservorios de 1600 cm<sup>3</sup> cada uno, los cuales estarán separados por una pared con una sección circular donde se posicionará la muestra de tomate con los pre-tratamientos. Después de ubicar la muestra de piel de tomate, la celda fue chequeada de fugas y reparada antes de cada experimento. La muestra de tomate es retenida en su posición mediante el uso de teflón, O-rings, tornillos y anillos de silicona, de modo de evitar fugas. Una vez chequeado que no existan fugas, se vierten las soluciones en los compartimentos de la celda de la siguiente forma: El lado de la cutícula de tomate en contacto con 1200 mL de solución de hidróxido del sodio en concentraciones del 0,1 % - 0,3% - 0,5%, el lado opuesto con 1200 mL de agua destilada los cuales son previamente calentados a baño maría hasta alcanzar la temperatura de operación. La temperatura durante la difusión fue controlada con la inmersión de la celda en un baño termostático (Digisystem, DSB-1000E), y monitoreada con termocuplas conectadas a un registrador de datos (Omega, OM-320) y una computadora mediante el software HiperWare™ versión 4.77. La variación de pH en el agua destilada se realizó a intervalos de 10-15 min mediante la recolección de 60 mL de muestra, disminuyendo su temperatura a 20 °C para su evaluación con pH-metro (Jenco VisionPlus pH6175) bajo agitación constante.

El experimento continúa hasta que la difusión alcance una velocidad estable de crecimiento en un periodo de tiempo de 1,5 a 3,0 h. Los experimentos se realizaron en duplicado.

## **2.2 Medición de Textura**

Las pruebas de indentación mecánica de las muestras de tomates antes y después del tratamiento con NaOH se realizaron mediante un texturómetro (Brookfield Engineering, modelo CT3- 50K, UK) como se muestra en la Figura 8, utilizando una sonda esférica de acero inoxidable (TA3/100) de 25,4 mm de diámetro. Los parámetros de medición fueron la variación de la fuerza de carga (N) en función de la distancia (mm), registrados por el software registrados por el software TexturePro CT v1.2.

La configuración del equipo correspondió a un desplazamiento de 20 mm, velocidad de la sonda 0,5 mm / s y carga de activación de 0,07 N.



Figura 8: Texturómetro

#### *Inicio de la prueba mecánica:*

La muestra de tomate fue posicionada horizontalmente sobre una base circular con agarre periférico, la cual maximiza la adhesión de contacto con la muestra evitando su deslizamiento. Durante la prueba de compresión la muestra fue presionada en su centro geométrico por la sonda móvil hasta su ruptura. Mediante los datos de fuerza [N] y distancia [mm] medidos en tiempo real, se calcula la Máxima carga [J], Modulo de Young [ $\text{N/m}^2$ ] y Trabajo [N] por unidad de espesor.

### **2.3 Coeficiente de difusión efectivo**

Para la obtención del coeficiente de difusión efectivo, se utilizará la forma presentada en la Ecuación [ 3 ] a través de la pendiente de la zona lineal de la gráfica concentración de iones hidroxilo [OH] vs tiempo. Esta es aplicable para procesos de difusión en membranas biológicas y se realizó a una temperatura constante de  $60 \pm 2$  °C con muestras expuestas previamente a un campo eléctrico de 1333[V/m].

El ajuste se llevará a cabo mediante el software OCTAVE 4.4.1, el cual considera los datos de pH, temperatura [°C], tiempo [s] y espesor de la muestra [mm] para el cálculo del Coeficiente de Difusión Efectivo ( $D_{\text{eff}}$ ). La rutina de cálculo es descrita en **Anexo 3: “Rutina de cálculo para Coeficiente de Difusión Efectivo”**

## 2.4 Diseño de experimentos

El diseño de experimentos permite el estudio de las interacciones entre las distintas variables y su efecto en la variable respuesta. Se efectuó un diseño factorial multinivel (n=18) con réplica cuyos factores se muestran en la Tabla 1 con un nivel de confianza del 95% en software Statgraphics Centurion (v. 15.2.05) utilizando el método estadístico Tukey-HSD.

*Tabla 1: Factores y Niveles del Diseño Experimental*

<b>Factor</b>	<b>Nivel</b>
Concentración de NaOH [% p/p]	0,1 – 0,3 – 0,5
Densidad de poro [ <i>poros/cm<sup>2</sup></i> ]	1,99 – 3,89 – 8,59
Diámetro de poro [ <i>μm</i> ]	128 – 194

Adicionalmente, para el control se realizaron 8 experimentos a una concentración de NaOH al 0,5% de los cuales 6 corresponden a la piel de tomate sólo con micro-perforaciones como pre-tratamiento y 2 a la piel sin pre-tratamientos.

# Capítulo 3 : Resultados y discusión

## 3.1 Micro-perforación Láser – CO<sub>2</sub>

Para determinar las condiciones del láser correspondientes a la densidad de poro y diámetro de poro, se realizaron distintas configuraciones del láser variando la potencia, número de pulsos y distancia del lente a la muestra, de forma tal que no penetrara más allá de la cutícula, verificando que esto se cumpliera con el uso de un microscopio, como se muestra en la Figura 9.

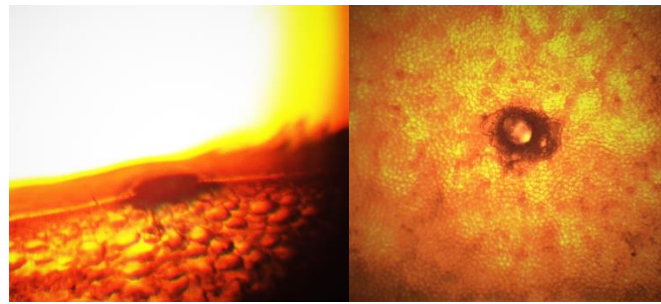


Figura 9: Vista microscópica de micro-poros en la piel de tomate

Dentro las diversas configuraciones realizadas, sólo 4 cumplieron lo dicho anteriormente (ver Resultados en **Anexo 1: “Configuraciones láser CO<sub>2</sub>”**). Los resultados se representan gráficamente en la Figura 10:

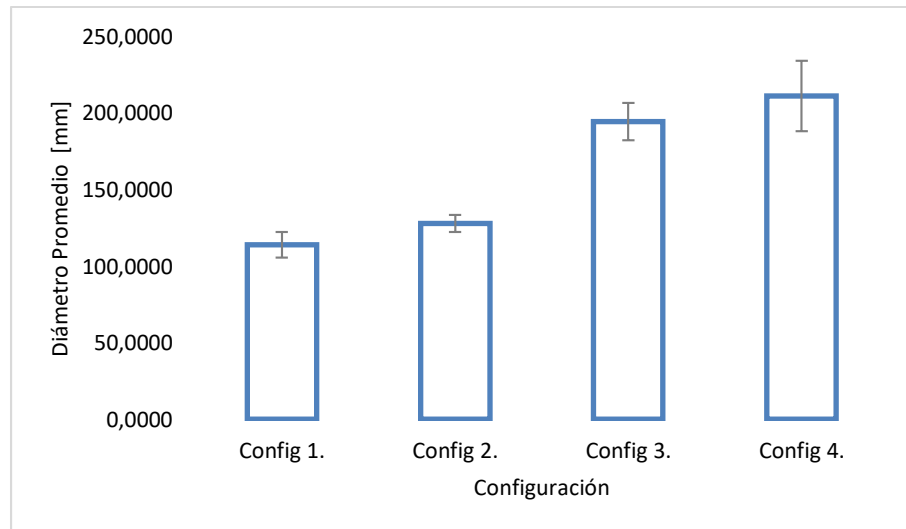


Figura 10: Resultados de mediciones del diámetro de poro

Se eligen las configuraciones 2 y 3, de diámetros 128 [μm] y 194 [μm] respectivamente, ya que las mediciones presentaron una menor desviación estándar, permitiendo obtener diámetros con una diferencia significativa en tamaño.

Para la densidad de poro, se realizaron distintas configuraciones de modo que su distribución sea uniforme en toda la muestra.

En base a experimentos preliminares de mediciones de concentración de NaOH en el tiempo, se eligen las densidades de poro que muestren diferencias considerables en la variación de concentración. Se elige un arreglo de 25, 49 y 108 poros por cada 12,57 cm<sup>2</sup> de superficie de la muestra (1,99 – 3,90 – 8,59 [poros/cm<sup>2</sup>], respectivamente).

El porcentaje de pérdida de masa de la muestra producto de la perforación resultó ser mínima. Para ello se realizaron mediciones de pérdida de masa en 5 muestras para cada densidad y diámetro de poro utilizado (30 mediciones en total), las cuales se muestran en la Tabla 2:

*Tabla 2: Pérdida de masa al aplicar perforaciones con láser CO2*

Diámetro de poro [μm]	Densidad de poro [poros/cm <sup>2</sup> ]	Promedio pérdida de masa [%]
128	1,99	0,024
	3,9	0,025
	8,59	0,031
194	1,99	0,021
	3,9	0,025
	8,59	0,028

### 3.2 Coeficiente de Difusión Efectivo

El Coeficiente de Difusión Efectivo representa la velocidad a la cual el NaOH difunde a través de la piel del tomate. Como se explica en el procedimiento experimental, este se determina mediante el cálculo de la pendiente de la zona lineal de la gráfica de concentración NaOH (% p/p) versus tiempo (s), como se muestra en la Figura 11 :

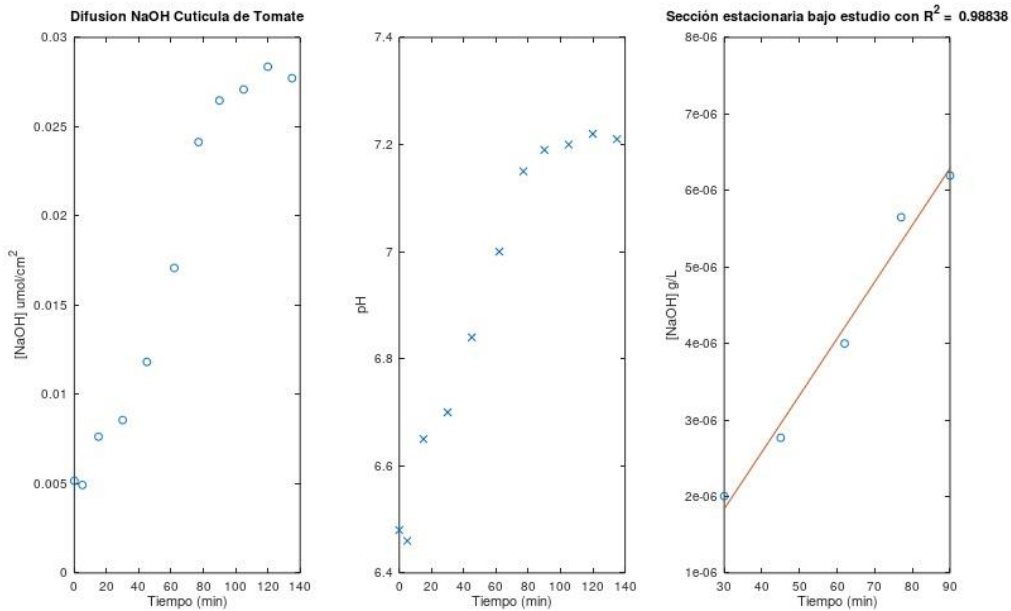


Figura 11: Concentración vs tiempo para experimento realizado a 0,1% de solución de NaOH, densidad de 3,89 [poros/ $\text{cm}^2$ ] y 128 [ $\mu\text{m}$ ] de diámetro de poro

### 3.2.1 Resultados

Con el fin de determinar si hay o no efecto significativo de los factores sobre las variables respuesta, se realiza un análisis de varianza (ANOVA). Para el control se realizaron 6 experiencias en duplicado para determinar el valor del Coeficiente de Difusión Efectivo sin modificación física los cuales se presentan en la [Tabla 3](#) :

*Tabla 3: Experimentos Control (sin pre-tratamientos) con tratamiento químico*

Control	Concentración NaOH [%p/p]		
	0,1%	0,3%	0,5%
$D_{\text{eff}}$ [ $\text{m}^2/\text{s} \times 10^{11}$ ]	$5,02 \pm 0,02^{\text{a}}$	$5,71 \pm 0,24^{\text{b}}$	$10,73 \pm 0,35^{\text{c}}$

(a,b,c) diferentes letras representan diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ).

Los resultados obtenidos para cada experimento con tratamiento químico (promedio y desviación estándar) se muestran a continuación en la Tabla 4:

Tabla 4: Resultados Coeficiente de Difusión Efectivo $D_{eff}$ [ $m^2/s \times 10^{-11}$ ]				
Factores		Concentración NaOH [%p/p]		
Diámetro de poro [ $\mu m$ ]	Densidad de poro [poro/cm <sup>2</sup> ]	0,1%	0,3%	0,5%
128	1,99	4,45 ± 0,43 <sup>ace</sup>	5,56 ± 0,2 <sup>ace</sup>	9,89 ± 0,42 <sup>acf</sup>
	3,9	12,18 ± 2,42 <sup>acf</sup>	10,55 ± 0,66 <sup>acf</sup>	14,9 ± 4,72 <sup>bcf</sup>
	8,59	5,03 ± 2,1 <sup>ace</sup>	5,81 ± 0,06 <sup>ace</sup>	12,55 ± 3,91 <sup>bce</sup>
194	1,99	5,11 ± 0,07 <sup>ade</sup>	5,11 ± 0 <sup>ade</sup>	20,8 ± 0,57 <sup>bd</sup>
	3,9	9,02 ± 0,39 <sup>adf</sup>	5,61 ± 0,12 <sup>adf</sup>	24,95 ± 2,42 <sup>bdf</sup>
	8,59	11,34 ± 1,28 <sup>adf</sup>	6,89 ± 0,01 <sup>ade</sup>	20,77 ± 0,04 <sup>bd</sup>

(a,b) Diferentes letras representan diferencias estadísticamente significativas en columnas de concentración NaOH ( $p < 0.05$ ).

(c,d) Diferentes letras representan diferencias estadísticamente significativas en filas (ref. diámetro de poro) ( $p < 0.05$ ).

(e,f) Diferentes letras representan diferencias estadísticamente significativas en filas referenciadas a la densidad de poro ( $p < 0.05$ ).

El análisis indica que los factores que poseen mayor efecto sobre el valor del  $D_{eff}$  corresponde a la concentración de la solución de NaOH la densidad de poro y diámetro de poro ( $p < 0,05$ ).

Se realiza una prueba de Múltiples Rangos mediante el Método Tukey HSD (*Honestly Significant Difference*) para todas las variables dependientes. Esta prueba compara y determina que pares de medias son significativamente diferentes de otras. Los resultados indican que existen diferencias significativas entre las medias de los resultados obtenidos utilizando concentraciones de 0,1% y 0,5% & 0,3% y 0,5% con un nivel de confianza del 95%. La misma situación se visualiza al comparar las medias desde el punto de vista de los dos diámetros de poro. En que se refiere a la densidad de poro, existen diferencias estadísticamente significativas entre los experimentos realizados a 1,99 y 3,90 [poro/cm<sup>2</sup>] & 3,90 y 8,59 [poro/cm<sup>2</sup>]. En análisis y representación gráfica de las interacciones entre las variables se encuentran disponibles en **Anexo 4: “Análisis ANOVA y Prueba de Múltiples Rangos para  $D_{eff}$ ”**

La diferencia entre los resultados con y sin micro-perforaciones se representa gráficamente en **Anexo 5: “Representación gráfica de los resultados para el  $D_{eff}$ .”**

En la mayoría de los casos se evidencia una mejora en el proceso de difusión respecto al caso sin pre-tratamientos en un rango entre el 0,2% y 143%. Los resultados porcentuales que se muestran en la Tabla 5:

<i>Tabla 5: Diferencia porcentual entre valores del <math>D_{eff}</math> respecto al control [%]</i>				
Factores		Concentración NaOH [%p/p]		
Diámetro de poro [ $\mu\text{m}$ ]	Densidad de poro [poro/ $\text{cm}^2$ ]	0,1%	0,3%	0,5%
128	1,99	-11,4	-2,6	-7,8
	3,9	142,6	84,8	38,9
	8,59	0,2	1,8	17,0
194	1,99	1,8	-10,5	93,8
	3,9	79,7	-1,8	132,5
	8,59	125,9	20,7	93,6

El valor de  $D_{eff}$  mayor se obtuvo en las condiciones de: Concentración de NaOH del 0,5%, diámetro de poro de 194 [ $\mu\text{m}$ ] y densidad de poro de 3,90 [poro/ $\text{cm}^2$ ]. El porcentaje de mejora respecto al control es del 133%. Contrario a lo anterior, las condiciones que resultaron tener un menor valor en el  $D_{eff}$  corresponden a la concentración de NaOH 0,1%, diámetro de poro de 128 [ $\mu\text{m}$ ] y densidad de poro de 1,99 [poro/ $\text{cm}^2$ ].

En general, para los experimentos realizados con micro-perforaciones de 128 [ $\mu\text{m}$ ] no evidenciaron una mejora significativa en el valor del  $D_{eff}$  al realizar modificaciones físicas con las densidades de poro de 1,99 y 8,59 [poros/ $\text{cm}^2$ ], asemejándose los resultados a los del experimento control. Resultan mejoras considerables al realizar las micro-perforaciones con una densidad de poro intermedia de 3,90 [poro/ $\text{cm}^2$ ] para las distintas concentraciones de NaOH y diámetros de poro analizados.

Al efectuar modificaciones estructurales con el mayor diámetro de poro de 194 [ $\mu\text{m}$ ] se aprecian incrementos significativos en el valor del  $D_{eff}$ . Para todos los casos (densidades de poro) al utilizar una concentración de solución de NaOH de 0,5% se evidencia una mejora en el proceso de difusión con respecto al caso base. Para este diámetro de poro, los mayores incrementos en el valor del  $D_{eff}$  se visualizan a densidades de 3,90 y 8,59 [poros/ $\text{cm}^2$ ].

### 3.2.2 Efecto del Campo Eléctrico Moderado en el $D_{\text{eff}}$

Se realizaron 6 experimentos sin campo eléctrico moderado en condiciones del 0,5% de concentración de NaOH, utilizando las distintas densidades de poro y diámetros de poro estudiados en la investigación con el fin de determinar el efecto del campo eléctrico moderado en el valor del  $D_{\text{eff}}$ . Los resultados se muestran en la Tabla 6:

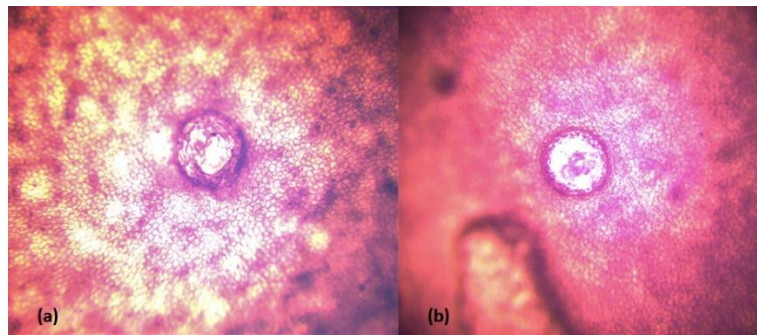
<i>Tabla 6: Resultados de Coeficiente de difusión efectivo sin CEM</i>		
$D_{\text{eff}}$ Sin Campo Eléctrico Moderado a 0,5% NaOH		
Diámetro de poro [ $\mu\text{m}$ ]	Densidad de poro [poro/ $\text{cm}^2$ ]	$D_{\text{eff}}$ [ $\text{m}^2/\text{s} \times 10^{11}$ ]
128	1,99	10,59
	3,9	16,63
	8,59	12,71
194	1,99	19,28
	3,9	20,17
	8,59	20,80

Al evaluar la diferencia entre los valores para el Coeficiente de Difusión con y sin CEM (ver **Anexo 6: "Variación porcentual del  $D_{\text{eff}}$  con respecto a los experimentos sin CEM"**), se puede distinguir que no existe un efecto significativo del CEM sobre el proceso difusivo, ya que las variaciones porcentuales están en el rango del -10% al 24%, por lo tanto, las modificaciones físicas micro-estructurales serían las responsables en el incremento del valor del  $D_{\text{eff}}$  con respecto al caso base.

### 3.2.3 Análisis de resultados

Los resultados obtenidos indican que para la mayoría de los casos, las modificaciones micro-estructurales poseen un efecto significativo sobre el valor del Coeficiente de Difusión Efectivo, llegando a incrementar su valor en un rango que varía entre el 0,2% y 143% respecto al control (piel sin tratamiento físico). Los resultados obtenidos mediante en el análisis de varianza indican que uno de los factores que posee mayor incidencia sobre el  $D_{\text{eff}}$  corresponde a la concentración de la solución de NaOH, lo cual reafirma el rol principal de éste como agente de pelado, el cual disuelve las ceras naturales al entrar en contacto con la piel, promoviendo su separación. Los valores más altos del  $D_{\text{eff}}$  se obtuvieron a concentraciones del 0,5% de solución NaOH.

De acuerdo con los resultados, se les atribuye principalmente la variación y mejora de los valores  $D_{\text{eff}}$  a las modificaciones físicas sobre la piel. Como se menciona anteriormente, para densidades intermedias de poro (3,90 [poros/cm<sup>2</sup>]) se obtienen mayores valores de  $D_{\text{eff}}$ , produciéndose mejoras respecto experimento control. Su valor aumenta de manera notable al utilizar un mayor diámetro de poro (194 [μm]). Contrario a lo que se esperaría al realizar el pre-tratamiento utilizando un alta densidad de poro (8,59 [poros/cm<sup>2</sup>]), la cual implicaría un aumento en el área de transferencia, y por consiguiente, una aumento en la tasa de traspaso de solutos a través de la piel de tomate, los resultados reflejan que se obtuvieron mayores valores de  $D_{\text{eff}}$  utilizando una densidad de poro intermedia. Esto se podría explicar por un excesivo daño en la piel del tomate al efectuar una gran cantidad de perforaciones con láser, generándose quemaduras en la superficie de la fruta y produciendo daños en una gran cantidad de áreas adyacentes a la perforación, las cuales no favorecerían al proceso de transferencia de materia. A continuación en la Figura 12 se puede apreciar el efecto de las micro-perforaciones sobre las áreas aledañas antes y después del tratamiento químico.



*Figura 12: Micro-perforación de tomate (a) antes de tratamiento a 0,5% [NaOH] (b) Post-tratamiento a 0,5% [NaOH]; diámetro 194 [μm]*

En base al mejor valor obtenido para el  $D_{\text{eff}}$  de  $2,5 \times 10^{-11}$  [m<sup>2</sup>/s], se estima un tiempo de proceso llevado a escala industrial utilizando las figuras del **Anexo 11: "Estimación de tiempo de proceso a escala industrial"**, resultando un tiempo menor a 10 [s].

El análisis muestra que el efecto del CEM no resultó ser significativo frente al producido por las modificaciones físicas a la piel de tomate.

### 3.3 Textura

Las transformaciones físicas producidas por el tratamiento de pelado con NaOH y micro-perforaciones producen cambios de textura del producto. A través de una prueba de indentación se estimaron los parámetros texturales normalizados con respecto al espesor de la muestra, correspondientes al Trabajo (J/m), Carga Máxima (N/m) y Módulo Elástico (Pa). Para determinar si existe un efecto de los factores sobre las variables dependientes, se realiza un análisis de varianza multifactorial (ANOVA).

Cabe destacar que para efectos de análisis, se considera como condición favorable en cuanto a textura del tomate la que señale un menor valor de firmeza, ya que esto indicaría que tan fácil resultaría el proceso de pelado en la etapa de remoción de la piel por medios mecánicos realizada a nivel industrial.

Con el fin de evaluar el efecto de las micro-perforaciones y el tratamiento químico en su conjunto, y establecer un potencial efecto sinérgico a nivel de textura, se determinan los parámetros texturales de la muestra sin y con modificación física, sin realizar un tratamiento químico. La rutina de cálculo realizada en el software Matlab (versión R2017b) se encuentra disponible en **Anexo 2: "Rutina de cálculo para Parámetros de Textura"**

Se efectuaron 14 pruebas de indentación con el fin de evaluar el impacto del tratamiento químico a nivel de textura sin tratamiento químico, de los cuales 2 corresponden al control (piel de tomate sin modificaciones físicas). Los resultados en la Tabla 7 muestran el efecto a nivel de textura de los pre-tratamientos sin tratamiento químico:

*Tabla 7: Parámetros texturales para muestras sin tratamiento químico*

Diámetro de poro [ $\mu\text{m}$ ]	Densidad de poro [poro/ $\text{cm}^2$ ]	Trabajo [J/m]	Máx. Carga [ $\text{N/m} \times 10^{-2}$ ]	Módulo Elástico [ $\text{N/m}^2 \times 10^{-7}$ ]
128	1,99	11,02 $\pm$ 7,52	56,82 $\pm$ 20,32 <sup>ac</sup>	6,21 $\pm$ 5,29 <sup>e</sup>
	3,9	12,66 $\pm$ 1,81	75,2 $\pm$ 12,16 <sup>ad</sup>	6,33 $\pm$ 1,8 <sup>e</sup>
	8,59	3,97 $\pm$ 1,31	23,7 $\pm$ 12,65 <sup>ac</sup>	5,36 $\pm$ 3,82 <sup>e</sup>
194	1,99	7,83 $\pm$ 2,57	56,28 $\pm$ 11,27 <sup>bc</sup>	22,28 $\pm$ 0,72 <sup>f</sup>
	3,9	12,54 $\pm$ 1,19	82,65 $\pm$ 9,28 <sup>bd</sup>	28,43 $\pm$ 3,78 <sup>f</sup>
	8,59	9,21 $\pm$ 2,73	60,17 $\pm$ 14,51 <sup>bc</sup>	22,6 $\pm$ 14,96 <sup>f</sup>
<b>CONTROL</b>	<b>CONTROL</b>	<b>22,03 <math>\pm</math> 1,21</b>	<b>119,56 <math>\pm</math> 9,17</b>	<b>20,94 <math>\pm</math> 1,41</b>

(a,b) Diferentes letras representan diferencias estadísticamente significativas en filas referenciadas al diámetro de poro en variable respuesta Carga Máxima ( $p < 0.05$ ).

(c,d) Diferentes letras representan diferencias estadísticamente significativas en filas referenciadas a la densidad de poro para la variable respuesta Máxima Carga ( $p < 0.05$ ).

(e,f) Diferentes letras representan diferencias estadísticamente significativas en filas referenciadas al diámetro de poro para la variable respuesta Módulo Elástico ( $p < 0.05$ ).

El análisis de varianza muestra que no existen diferencias significativas respecto al valor del Trabajo entre los experimentos con modificación física, sin embargo, al comparar los valores con el control, se aprecia una disminución del orden del 60%. Para la máxima carga, se afirma que existe un efecto tanto del diámetro y de la densidad de poro ( $p < 0,05$ ). El porcentaje de disminución en la Máxima Carga con respecto al experimento control, es de aproximadamente un 50%. En cuanto al Módulo Elástico, se encuentran diferencias significativas al comparar las medias de los resultados con los distintos diámetros de poro ( $p < 0,05$ ). Se logra una reducción del 70% al utilizar micro-perforaciones con diámetro de poro de 128  $[\mu\text{m}]$ , mientras que se evidencia un aumento de aproximadamente un 1% al realizar micro-perforaciones con diámetro de 194  $[\mu\text{m}]$ . El análisis ANOVA se encuentra en el **Anexo 7: "Análisis ANOVA multivariable de textura para muestras con micro-perforaciones y sin tratamiento químico"**

Además, se tiene como patrón la muestra con tratamiento químico y sin micro-perforaciones a una concentración del 0,5%:

*Tabla 8: Control experimento con tratamiento químico y sin micro-perforaciones*

Concentración de NaOH [%p/p]	Trabajo [N/m]	Máx. Carga [N/m $\times 10^{-2}$ ]	Módulo Elástico [N/m $^2 \times 10^{-7}$ ]
0,5	18,98	103,61	20,95

### 3.3.1 Trabajo

Los resultados obtenidos del cálculo del trabajo en la Tabla 9:

*Tabla 9: Resultados obtenidos para el Trabajo*

Trabajo [N/m]		Concentración [%p/p]		
Diámetro de poro $[\mu\text{m}]$	Densidad de poro [poro/cm $^2$ ]	0,1%	0,3%	0,5%
128	1,99	18,78 $\pm$ 3,28 <sup>e</sup>	6,53 $\pm$ 2,76 <sup>bc</sup>	2,81 $\pm$ 0,12 <sup>bd</sup>
	3,90	8,76 $\pm$ 6,05 <sup>ac</sup>	5,96 $\pm$ 0,94 <sup>bc</sup>	5,86 $\pm$ 0,36 <sup>bc</sup>
	8,59	8,5 $\pm$ 0,61 <sup>ac</sup>	5,87 $\pm$ 1,44 <sup>bc</sup>	6,62 $\pm$ 6,16 <sup>bc</sup>
194	1,99	5,56 $\pm$ 1,62 <sup>bd</sup>	3,74 $\pm$ 1,91 <sup>bd</sup>	2,2 $\pm$ 0,78 <sup>bd</sup>
	3,90	15,8 $\pm$ 3,75 <sup>e</sup>	1,55 $\pm$ 0,28 <sup>bd</sup>	2,61 $\pm$ 0,11 <sup>bd</sup>
	8,59	8,58 $\pm$ 2,81 <sup>ac</sup>	1,9 $\pm$ 0,59 <sup>bd</sup>	6,26 $\pm$ 0,43 <sup>bd</sup>

(a,b) Diferentes letras representan diferencias estadísticamente significativas en columnas de concentración NaOH ( $p < 0.05$ ).

(c,d,e) Diferentes letras representan diferencias estadísticamente significativas en filas referenciadas al diámetro de poro ( $p < 0.05$ ).

Del análisis ANOVA para el Trabajo, se obtiene que el diámetro de poro y concentración de la solución NaOH corresponde a las variables con mayor significancia estadística ( $p < 0,05$ ).

La prueba de Múltiples Rangos para el Trabajo indica a que existen diferencias estadísticamente significativas con un 95% de nivel de confianza de los valores del trabajo entre experimentos realizados con micro-perforaciones de 128  $[\mu\text{m}]$  y 194  $[\mu\text{m}]$  de diámetro, así como entre las medias de los experimentos efectuados a concentraciones del 0,1% y 0,3% & 0,1% y 0,5%. Comparando los resultados obtenidos para un 0,5% de concentración de soda respecto al control, se observa una disminución del trabajo del orden del 70% para los experimentos realizados con perforaciones de diámetro 128  $[\mu\text{m}]$  versus una del orden del 80% para los experimentos con diámetros de 194  $[\mu\text{m}]$ . El detalle del ANOVA y la representación gráfica de las interacciones entre variables se encuentra disponible en el **Anexo 8: “Análisis ANOVA y Prueba de Múltiples Rangos para el Trabajo”**

### 3.3.2 Módulo Elástico

Para Módulo Elástico, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 10:

*Tabla 10: Resultados para el Módulo Elástico*

Módulo elástico [N/m <sup>2</sup> × 10 <sup>-7</sup> ]		Concentración NaOH [%p/p]		
Diámetro de poro [ $\mu\text{m}$ ]	Densidad de poro [poro/cm <sup>2</sup> ]	0,1%	0,3%	0,5%
128	1,99	57,95 ± 15,09 <sup>a</sup>	26,025 ± 3,77 <sup>a</sup>	3,23 ± 3,00 <sup>b</sup>
	3,90	15,27 ± 11,31 <sup>a</sup>	3,9 ± 1,08 <sup>b</sup>	7,38 ± 6,45 <sup>b</sup>
	8,59	22,13 ± 5,93 <sup>a</sup>	20,87 ± 21,48 <sup>a</sup>	38,21 ± 49,61 <sup>a</sup>
194	1,99	8,22 ± 4,32 <sup>b</sup>	8,12 ± 0,10 <sup>b</sup>	11,02 ± 5,53 <sup>b</sup>
	3,90	18,36 ± 1,01 <sup>a</sup>	12,21 ± 0,01 <sup>b</sup>	5,14 ± 1,03 <sup>b</sup>
	8,59	9,66 ± 0,73 <sup>b</sup>	4,97 ± 2,67 <sup>b</sup>	3,05 ± 1,50 <sup>b</sup>

(a,b.) Diferentes letras representan diferencias estadísticamente significativas en filas referenciadas al diámetro de poro ( $p < 0,05$ ).

El ANOVA indica que existe un efecto con significancia estadística el cual se atribuye al diámetro de poro ( $p < 0,05$ ), existiendo una diferencia entre las medias de los grupos de resultados para ambos diámetros según el Test de Múltiples Rangos. A modo general, para los experimentos realizados al 0,5% de concentración de NaOH, se observa una disminución del valor del módulo elástico en un orden de magnitud (aproximadamente un 70%) con respecto al control. El detalle se encuentra en el **Anexo 9: “Análisis ANOVA y Prueba de Múltiples Rangos para el Módulo Elástico”**

### 3.3.3 Carga Máxima

Los resultados se muestran en la Tabla 11:

*Tabla 11: Resultados para Máxima Carga*

Máxima Carga [N/m x 10 <sup>-2</sup> ]		Concentración de NaOH [%p/p]		
Diámetro de poro [µm]	Densidad de poro [poro/cm <sup>2</sup> ]	0,1%	0,3%	0,5%
128	1,99	107,73 ± 12,4 <sup>ce</sup>	50,07 ± 18,82 <sup>be</sup>	35,62 ± 5,91 <sup>be</sup>
	3,9	76,86 ± 35,13 <sup>ce</sup>	41,94 ± 3,96 <sup>be</sup>	20,14 ± 0,73 <sup>ad</sup>
	8,59	32,76 ± 0,90 <sup>be</sup>	27,41 ± 11,64 <sup>ad</sup>	38,25 ± 32,9 <sup>be</sup>
194	1,99	23,96 ± 12,67 <sup>ad</sup>	26,02 ± 8,8 <sup>ad</sup>	19,7 ± 6,27 <sup>ad</sup>
	3,9	89,82 ± 14,7 <sup>ce</sup>	15,27 ± 2,26 <sup>ad</sup>	19,67 ± 1,84 <sup>ad</sup>
	8,59	50,54 ± 11,29 <sup>be</sup>	13,29 ± 3,97 <sup>ad</sup>	9,51 ± 1,16 <sup>ad</sup>

(a,b,c) Diferentes letras representan diferencias estadísticamente significativas en columnas de concentración NaOH (p<0.05).

(d,e) Diferentes letras representan diferencias estadísticamente significativas en filas referenciadas al diámetro de poro (p<0.05).

El análisis ANOVA indica que las variables que más incidencia poseen sobre el valor de la Máxima Carga corresponden a la concentración de NaOH y al diámetro de poro (p<0,05).

El test de Múltiples Rangos indica que existen diferencias estadísticamente significativas en los valores de trabajo obtenidos para las muestras tratadas a las distintas concentraciones de NaOH del 0,1% y 0,5% & 0,1 y 0,3%; así como también para las muestras con distinto diámetro de poro, con un nivel de confianza del 95%. En comparación con el control, el valor de la carga máxima para una concentración del 0,5% se redujo en un 70 % (valor estimado).

El detalle de los resultados se encuentra en el **Anexo 10: “Análisis ANOVA y Prueba de Múltiples Rangos para la Máxima Carga”**

### 3.3.4 Análisis de resultados para Textura

Resultado del análisis se puede evidenciar el efecto del tratamiento con NaOH y las micro-perforaciones al comparar la textura de las muestras con y sin tratamiento químico. Al contrastar los resultados de los parámetros de textura del control (piel de tomate sin tratamiento químico) con las muestras a las cuales se aplicó micro-perforaciones (sin tratamiento químico) se muestra una pérdida de la firmeza considerable, efecto que es atribuido a las modificaciones físicas. Al utilizar un diámetro de poro de 128 [µm], los parámetros de textura experimentan en general una mayor reducción de la firmeza respecto

al control, a diferencia de lo que se obtiene al realizar la evaluación con perforaciones de diámetros de 194 [ $\mu\text{m}$ ]. Este efecto se atribuye al excesivo daño que produce el láser en la piel del tomate utilizando diámetros grandes, cuya consecuencia se examinó por medio del microscopio óptico, mostrando la generación de costras (durezas) alrededor en las áreas adyacentes a la perforación, en este caso abarcando una mayor área que utilizando diámetros más pequeños.

Al comparar la textura del patrón con tratamiento químico y sin modificaciones estructurales con las muestras que sí poseen micro-perforaciones y tratamiento químico, se puede evidenciar el efecto de la concentración de la solución en el valor de los parámetros texturales. A concentraciones del 0,1%, no se evidencia una pérdida de la firmeza considerable, sin embargo, a concentraciones altas de NaOH del 0,3% y 0,5%, se logra una reducción de la rigidez (Trabajo, Carga Máxima y Mód. Elástico) del orden del 70% respecto al control con tratamiento químico y del orden del 80% respecto al control sin tratamiento químico (ambos patrones sin micro-perforaciones). Este demuestra la importancia que posee la concentración de NaOH a nivel de textura, la cual resulta evidente, dado a que corresponde al agente de pelado, cuyo efecto a nivel micro-estructural es la eliminación de las ceras que actúan como barrera al traspaso de solutos (Flores, Chinnan, & Wetzstein, 1987).

La interacción entre los factores de concentración y modificaciones físicas serían las responsables en la disminución de la rigidez de la piel del tomate, lo que a nivel industrial implicaría facilitar la remoción de la piel cuando se emplean procedimientos de mecánicos en una etapa post-tratamiento químico.

## Capítulo 4 : Conclusiones

El proceso de pelado químico con NaOH acoplado a un pre-tratamiento con micro-perforaciones láser CO<sub>2</sub> resulta ser una alternativa viable en la mejora del proceso difusivo del agente químico a través de la piel de tomate (*Lycopersicon esculentum*).

Se investigó el proceso de pelado químico de tomate a 60 °C, siendo el diámetro de poro, densidad de poro y concentraciones de NaOH los factores bajo estudio para un pre-tratamiento con CEM. De lo anterior, se evaluó el efecto sobre los valores de coeficiente de difusión efectivo y textura del producto final. Un gran incremento del  $D_{eff}$  se observó al realizar el experimento a la mayores concentraciones del NaOH del estudio (0,3% y 0,5%), así como utilizando el mayor diámetro de poro (194 [μm]) a una densidad de poro intermedia (8,90 [poros/cm<sup>2</sup>]), resultando en incrementos que varían en un rango del 93% al 133% respecto al experimento control (difusión a través de la piel de tomate sin micro perforaciones). En general, se obtuvieron mejoras sustanciales para gran parte de los experimentos, exceptuando los realizados a la más baja densidad y diámetro de poro, cuyos valores del  $D_{eff}$  se asemejaban al estimado con el experimento base. En todos los experimentos efectuados con la mayor concentración y diámetro de poro del estudio, se obtuvieron mejoras en el valor del  $D_{eff}$  con respecto al experimento realizado a la concentración de NaOH utilizada a nivel industrial del 8%, ya que su valor aumentó desde  $2,0 \times 10^{-12}$  [m<sup>2</sup>/s] (Floros & Chinnan, 1990) a  $2,1 - 2,5 \times 10^{-10}$  [m<sup>2</sup>/s] como promedio bajo las condiciones óptimas de procesamiento, destacando la eficiencia del tratamiento previo.

Se logró obtener una textura con menor rigidez al efectuar los pre-tratamientos con láser CO<sub>2</sub>, lo cual se comprobó mediante una comparación con un patrón sin micro-perforaciones. Sin embargo, el uso de concentraciones más altas de solución de NaOH (0,3% y 0,5%) redujo notablemente el valor de los parámetros texturales (orden 80% respeto al control), lo que a nivel industrial se traduciría en una facilitación en etapa remoción de la piel de tomate por medios mecánicos, considerando las bajas concentraciones a las cuales se realizaron los experimentos.

Dado los resultados y evaluando la influencia de los factores en los valores de las variables respuestas (indicados por el análisis estadístico), se recomendaría investigar el efecto que tendría un tratamiento con mayor diámetro de poro utilizando menores concentraciones de NaOH (cerca al 0,3%), y de esta forma y evaluar si es posible

obtener valores del  $D_{\text{eff}}$  similares los que resultaron de los experimentos efectuados a una concentración de NaOH del 0,5% con diámetro de poro de 194 [ $\mu\text{m}$ ].

El pre-tratamiento que involucra micro-modificaciones en la piel de tomate, además de resultar poco invasivas para la estructura celular, sirven como una vía alternativa para facilitar el proceso de difusión de NaOH, predominando este efecto por sobre la aplicación de un Campo Eléctrico Moderado de acuerdo con los resultados obtenidos. Se demuestra en esta investigación que el uso del láser como nuevo pre-tratamiento para mejora el rendimiento del proceso de pelado de tomates resultaría como una alternativa atractiva para reducir tanto costos económicos como ambientales que conlleva el tratamiento de efluentes altamente alcalinos producidos en la industria al reducir las concentraciones de hidróxido de sodio de manera considerable.

## Referencias

- Agribenchmark*. (31 de marzo de 2014). Obtenido de <http://www.agribenchmark.org/agribenchmark/did-you-know/einzelansicht/artikel//tomatoes-are.html>
- Aguilera, J. (2004). Why food microestructure? *Journal of Food Engineering*, 3.
- Aguilera, J., & Durán, L. (1996). Glosario de Términos Reológicos en español y portugués. Valencia, España.
- Albert, Bray, D., Lewis, J., Raff, J., & Robert, M. (1983). *Molecular Biology of the Cell*. Garland Publishing, Inc., .
- Ayvaz, H., & Rodriguez-Saona, L. (2016). Understanding of Tomato Peelability. *J of Food Science*.
- Bargel , H., & Neinhuis , C. (2005). Tomato fruit growth and ripening as related to the biomechanical properties of fruit skin and isolated cuticle. . *J. Exp. Bot.*, 56, 1049-1060.
- Barreiro, J., Sandoval, A., Rivas, D., & Rinaldi, R. (2007). Application of a mathematical model for chemical peeling of peaches (*Prunus persica* L.) variety Amarillo Jarillo. *Elsevier*, 574-578.
- Barringer, S., Bennett, M., & Bash, W. (2008). Effect of fruit maturity and nitrogen fertilizer levels on tomato peeling efficiency. *J Veg Crop Prod*, 5:3-11.
- Beecher, G. (1998). Nutrient content of tomatoes and tomato products. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.*
- Bilanski, W., & Ferraz. (1991). *Processing agricultural materials with a CO2 laser: a liner model*. International Winter Meeting; , Chicago,Chicago, Illinois, EEUU.
- Bird, B., Stewart, W., & N. Lightfoot, E. (2002). *Transport Phenomena*. New York: John Wiley & Sons, ING.
- Crank, J. (1980). *The Mathematics of Diffusion*. Oxford University Press. Oxford University Press.

- Das, D., & Barringer, S. (2007). Use of organic solvents for improving peelability of tomatoes. *J of Food Science*.
- Domínguez , Heredia-Guerrero, J., & Heredia, A. (2011). The biophysical design of plant cuticles: an overview. 189:938-949.
- Esau, K. (1977). *Anatomy of Seed Plants*. New York: 2nd ed John Wiley and Sons.
- Fellows, P. (2000). *Food processing technology principles and practice*. Boca Raton, FL: 2nd Ed. CRC Publ.
- Ferraz, A., Carlos, O., Mittal, S., & Bilanski, K. (2007). Mathematical modeling of laser based potato cutting and peeling. *BioSystems* , 90, 602-613.
- Floros, J., & Chinnan, M. (1988). Microstructural changes during steam peeling of fruits and vegetable. *J. Food Sci.*, 53(3): 849-853.
- Floros, J., & Chinnan, M. (1989). Determining the diffusivity of sodium hydroxide, through tomato and capiscun skin. *J Food Eng.*, 9:129-41.
- Floros, J., & Chinnan, M. (1990). Diffusion phenomena during chemical (NaOH) peeling of tomatoes. *J Food Sc.*, 55:552-3.
- Floros, J., Chinnan, M., & Wetzstein, H. (1987). Chemical (NaOH) peeling as viewed by scanning electron microscopy: pimienta pepper as a case study. *J. Food Science*.
- Fujimaru, T., Ling, Q., & Morrissey, M. (2012). Effects of Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) Laser Perforation as Skin Pretreatment to Improve Sugar Infusion Process of Frozen Blueberries. *Journal of Food Science*, 77(2), E45-E51.
- George, B., Kaur, C., Khurdiya, D., & Kapoor, H. (2004). Antioxidants in tomato (*Lycopersium esculatum*) as a function of genotype. *J of Food Chem*, 24:45-51.
- Guine, R., Andrade, S., Correia, A., Jordao, A., Lopes, A., & Ferreira, D. (2011). Evaluation of textural properties in apples of regional varieties. *. Int. J. Food Prop.*, 14, 331-338.
- Hetzroni, A., Vana, A., & Mizrach, A. (2010). Biomechanical characteristics of tomato fruit peels. *Post Harvest Biology and Technology*.

- Ho, L., & Hewitt, J. (1986). *The tomato Crop: A Scientific Basis for Improvement*. New York: Chapman and Hall.
- Ibarz, A., & Barbosa-Cánovas, G. (2011). *Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos*. México: Mundi-Prensa.
- Jammer, M. (1957). *Concepts of Force*. Cambridge, MA: Harvard University Press,. Cambridge: MA: Harvard University Press,.
- Kimura , & Sinha, N. (2008). Tomato (*Solanum lycopersicum*): A Model Fruit-Bearing Crop. *E med*.
- Lima, M., & Sastry, S. (1999). The effects of ohmic heating frequency on hot-air drying rate and juice yield. *J Food Eng*, 115-119.
- Malik , M., Afzal Khan, M., Naeem, A., & ul Haq, A. (2003). Ball indentation analysis of a tough polymer sheet. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 12:561-568.
- Nabil , S., Albaloushi, N., Mostafa , M., & Ayman , H. (2012). Mechanical Properties of Tomato Fruits Under Storage Conditions. *Journal of Applied Sciences Research*, 8(6): 3053-3064.
- Ondra, N., & Ellis, B. (1998). *Soils and Composting: the complete guide to building a heatly fertile soil*. New York: Houghton Mifflin Company, New York.
- Pandrangui, S. (1998). Treatment of tomato industry effluent by coagulation using ferric chloride and factor affecting peelability of tomatoes. *MS thesis*.
- Riederer, M. (2006). *Introduction: biology of the plant cuticle: In: Biology of the Plant Cuticle*. Germany.
- Rock, C., Yang, W., Goodrich-Schneider, R., & Feng, H. (2011). *Conventonal and Alternative Methods for Tomato Peeling*. Springer.
- Rogers, W., Buritz, R., & Alpert, D. (s.f.). Diffusion coefficient, solubility, and permeability for helium in glass. *J. Appl. Phys*25, 868-75.

- Sams, C. (1999). Preharvest factors affecting postharvest texture. *Postharvest Biol. Technol.*, 15, 249-254.
- Sastry, S. (2008). Ohmic Heating and Moderate Electric Field Processing. *Food Science and Technology International*, 419-420.
- Savaldi-Goldstein, S., Peto, C., & Chory, J. (2007). The epidermis both drives and restricts plant shoot growth. *PubMed*, 446: 199–202.
- Shi, J., & Le Maguer, M. (2000). Lycopene in tomatoes: chemical and physical properties affected by food processing. *Crit Rev Biotechnol.*, 40(1):1-2.
- Smith, J., & Hui, Y. (2004). *Food Processing: principles and applications*. Iowa: Blackwell.
- Sood, P., Ference, C., Narciso, J., & Etxeberria, E. (2009). Laser etching: a novel technology to label Florida grapefruits. *Horttechnology*, 19:504-10.
- SYNRAD. (2017). *Synrad, a Novanta company*. Obtenido de <https://www.synrad.com/products/lasers/ti-series>
- Tanzi, E., Lupton, J., & Alster, T. (2003). Lasers in dermatology: four decades of progress. *J Am Acad Dermatol* 49, 1-31.
- Wilson, L., & Sterling, C. (1976). Studies on cuticle of tomato fruit. *Zeitschrift für Pflanzenphysiologie*, 77:359-71.
- Wongsa-Ngasri, P., & Sastry, S. (2016a). Effect of ohmic heating on tomato peeling. *J of Food Science*, 61:269-74.
- Wongsa-Ngasri, P., & Sastry, S. (2016b). Tomato peeling by ohmic heating with lye-salt combinations: Effects of operational parameters on peeling time and skin diffusivity. *J Food science*.
- Wongsa-Ngasri, P., & Sastry, S. (2016c). Tomato peeling by ohmic heating: Effect of lye-salt combinations and post-treatments on weight loss, peeling quality and firmness. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 148-153.
- Zhiguo Li, L., Hongling, Y., Pingping Li, L., Jizhan, L., Jizhang, W., & Yunfeng, X. (2013). Fruit biomechanics based on anatomy: a review. *International Agrophysic*, 97-106.

# Anexos

## Anexo 1: "Configuraciones láser CO<sub>2</sub>"

N° Configuración	Distancia del objeto [mm]	Potencia [%]	N° de pulsos	$\bar{X}$ Diámetro de poro [ $\mu\text{m}$ ]	Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
Config. 1	370	10	1	114	8
Config. 2	125	10	2	128	5
Config. 3	370	10	2	194	12
Config. 4	125	8	2	211	23

## Anexo 2: "Rutina de cálculo para Parámetros de Textura"

```
clear all
clc
format short
% INTERVALO DE MODULOS DE ELASTICIDAD A EVALUAR ==> MODIFICABLE
E = [1e7 1e9];
% Características de la cutícula
Diam1_sonda = xlsread('Datos_PropMecanicos','Sheet1','B5'); % Diámetro Sonda (mm)
Diam_sonda = Diam1_sonda/1000; %Diámetro Sonda (m)
r_sonda = Diam_sonda/2; % Radio de la sonda (m)
Diam2_muestra = xlsread('Datos_PropMecanicos','Sheet1','B6'); % Diámetro Muestra (mm)
Diam_muestra = Diam2_muestra/1000; %Diámetro muestra (m)
r_muestra = Diam_muestra/2; % Radio de la muestra (m)
Esp1 = xlsread('Datos_PropMecanicos','Sheet1','B3'); % Espesor de muestra (mm)
sp = Esp1/1000; % Espesor de muestra (m)
Veloc_Test = xlsread('Datos_PropMecanicos','Sheet1','B4'); % Veloc (mm/s)
Veloc_Test = Veloc_Test/1000; % Velocidad m/s
Datos_Proc = xlsread('Datos_PropMecanicos','Sheet1','A8:E2000'); % Matrix de datos
tiempo = Datos_Proc(:,1); % tiempo de medición (s)
dist = Datos_Proc(:,2); % desplazamiento de sonda (mm)
dist = dist/1000; % desplazamiento de sonda (m)
carga = Datos_Proc(:,3); % Fuerza de compresión (N)
carga_max = max(carga);
n = length(carga);
for i = 1:n
    c = carga (i);
    if c < carga_max
        carga_util(i) = c;
    else
        break
    end
    R1 = [carga_util]';
end
```

```

R = [R1;c];
d = dist(1:length(R));
Datos_Proc = [d R];
Trabajo = trapz(d,R); % Trabajo aplicado (J)
cm = num2str(carga_max/Esp); % Fuerza de compresión aplicada por unidad de espesor (N/m)
W = num2str(Trabajo/Esp); % Trabajo aplicado por unidad de espesor (J/m)
esp = num2str(Esp1); %
% Rutina para el cálculo del Módulo de Elasticidad (E [Pa]) en cutículas
% utilizando una Sonda Esférica.
% Ball indentation analysis of a tough polymer sheet
% Nazeer M. 2003
% Suposiciones: 1. Espesor constante; 2. Energía no disipada por calor
% Datos a utilizar
Trabajo_Exp = Trabajo;
F = R;
t0 = Esp;
rp = r_muestra;
%rd = r_sonda;
rd = sqrt(r_sonda^2-(r_sonda-d(end))^2);
n = length(E);
w = 1;
for i = 1:iter
factor = (g-d(end))/g;
    if abs(w) > 1e-6
        i
        E = E;
    for k = 1:n
We = 3*F.^2*(rp^2-rd^2)/(pi*t0^3*E(k));
funct(k) = We_Total(k)-Trabajo_Exp;
end
f_a = funct(1);
f_b = funct(2);
crit = f_a*f_b;
if crit < 0
display('Existe raíz en intervalo, por lo cual es posible estimar E [Pa]')
else
display('No existe raíz, definir otro intervalo')
Respuesta
end
if crit < 0
E(3) = E(2) - (E(2)-E(1))*f_b/(f_b-f_a);
We_c = 3*F.^2*(rp^2-rd^2)/(pi*t0^3*E(3));
We_Total_c = sum(We_c)*factor;
funct_c = We_Total_c - Trabajo_Exp;
E_val = [E(1) E(3) E(2)];
f = [funct(1) funct_c funct(2)];
hold on
drawnow
subplot(3,1,1)
loglog(i,E(3),'o')
xlabel('iteraciones')
ylabel('Módulo Elástico (Pa)')

```

```

hold on
drawnow
subplot(3,1,2)
loglog(i,abs(funcnt_c),'-')
xlabel('iteraciones')
ylabel('Valor de f(c)')
if f(1)*f(2) < 0
    E(2) = E(3);
    E(1) = E(1);
else
    E(1) = E(3);
    E(2) = E(2);
end
end
E = [E(1) E(2)];
w = abs(f(2))
else
    Respuesta;
end
Respuesta = E_val(2);
end
display('El valor del módulo de elasticidad E [Pa] es = ')
Respuesta = E_val(2)
Resp = num2str(Respuesta);
subplot(3,1,3)
plot(d,R,'x')
area(d,R)
title({'Propiedades Mecánicas con Fuerza máxima (N/m) = ' cm ' y W (J/m) = ' W ' con un
Espesor (um) = ' esp ' y E [Pa] = ' Resp'})
xlabel('Distancia (m)')
ylabel('Carga (N)')

```

### Anexo 3: “Rutina de cálculo para Coeficiente de Difusión Efectivo”

```

format long
clear all
clc
Tiempo = [];
pH = [];
Temp = [];
Vol_agua = 1200; % mL
Espesor_cuticula = ; % mm
Espesor_cuticula = Espesor_cuticula/1000; % Espesor m
Diametro = 29.9; % mm
Diametro = Diametro/10; %m
Area_trans = pi*(Diametro^2)/4; % area de transferencia m^2
PM_NaOH = 39.997; % Peso molecular NaOH (g/mol)
Temp_promedio = mean(Temp); % °C
T = Temp_promedio; %°C
% Correlación para la densidad en función de la temperatura
a = [999.83952 16.945176 -7.9870401e-3 -46.170461e-6 105.56302e-9 -280.54253e-12
16.89785e-3];

```

```

Dens_agua = ((a(1)+a(2)*T+a(3)*T^2+a(4)*T^3+a(5)*T^4+a(6)*T^5)/(1+a(7)*T))/1000; %
g/mL
Masa_agua = Vol_agua*Dens_agua; % masa de agua g
pOH = 14-Resumen(:,2);
OH = 10.^(-pOH);
n_mol = OH*Vol_agua/1000;
masa = n_mol*PM_NaOH;
P_V1 = masa/(Vol_agua/1000); % concentración g/L
P_V = P_V1*0.1/100; % concentracion g/100 mL
n_area = n_mol/Area_trans;
% SELECCION DE DATOS PARA DETERMINAR COEFICIENTE DE DIFUSION ROGERS
et al.1954
a = %min
b = %min
[g] = find(Resumen(:,1) >= a & Resumen(:,1)<= b );
tiempo2 = Resumen(g(1):g(end),1);% tiempo (min)
tiempo_s2 = tiempo2*60; % tiempo (s)
t05_s2 = tiempo_s2.^0.5; % raíz del tiempo (s)^0.5
concent2 = P_V1(g(1):g(end)); % [NaOH] g/L
P = polyfit(tiempo_s2,concent2,1);
Correl_P = corrcoef(tiempo_s2,concent2);
Correl_P_dC_dt = Correl_P(2,1);
R = polyfit(tiempo2,concent2,1);
Q = polyval(P,tiempo_s2);
Comparac = [concent2 Q];
dC_dt = P(1); % Flujo NaOH g/(L*s)
Y = log(t05_s2*dC_dt);
X = 1./tiempo_s2;
P2 = polyfit(X,Y,1);
Correl_P2 = corrcoef(X,Y);
Correl_P2_Est = abs(Correl_P2(2,1));
m1 = P2(1);
inters1 = P2(2);
D_eff = abs((Espesor_cuticula)^2/(m1*4)) % Coeficiente de difusion efectivo m^2/s
display(['El valor de Coeficiente de difusion efectivo es (m^2/s) = ' num2str(D_eff)])
% Gráfica de resultados
subplot(1,3,1)
plot(Tiempo,n_area*10^6,'o')
title('Difusion NaOH Cuticula de Tomate')
xlabel('Tiempo (min)')
ylabel('[NaOH] umol/cm^2')
subplot(1,3,2)
plot(Tiempo,pH,'x')
xlabel('Tiempo (min)')
ylabel('pH')
subplot(1,3,3)
plot(tiempo2,concent2,'o',tiempo2,polyval(R,tiempo2),'-')
xlabel('Tiempo (min)')
ylabel('[NaOH] g/L')
title(['Sección estacionaria bajo estudio con R^2 = ' num2str(Correl_P2_Est)

```

## Anexo 4: “Análisis ANOVA y Prueba de Múltiples Rangos para $D_{eff}$ ”

### Análisis de Varianza para $D_{eff}$ - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Diámetro poro	109,709	1	109,709	10,34	0,0030
B:Densidad de poro	111,396	2	55,6981	5,25	0,0107
C:Concentración	829,941	2	414,97	39,11	0,0000
RESIDUOS	339,5	32	10,6094		
TOTAL (CORREGIDO)	1401,92	37			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

### Pruebas de Múltiple Rangos para $D_{eff}$ por Diámetro de poro

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Diámetro poro	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
127,925	20	8,6599	0,498445	X
194,3987	18	11,9883	0,520127	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
127,925 - 194,3987	*	-3,32844	1,48684

\* indica una diferencia significativa.

### Pruebas de Múltiple Rangos para $D_{eff}$ por Densidad de poro

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Densidad de poro	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
1,99	12	8,15583	0,637023	X
8,59	13	10,3068	0,617609	X
3,90	13	12,5097	0,617609	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1,99 - 3,90	*	-4,35387	2,21646
1,99 - 8,59		-2,15098	2,21646
3,90 - 8,59	*	2,20289	2,1833

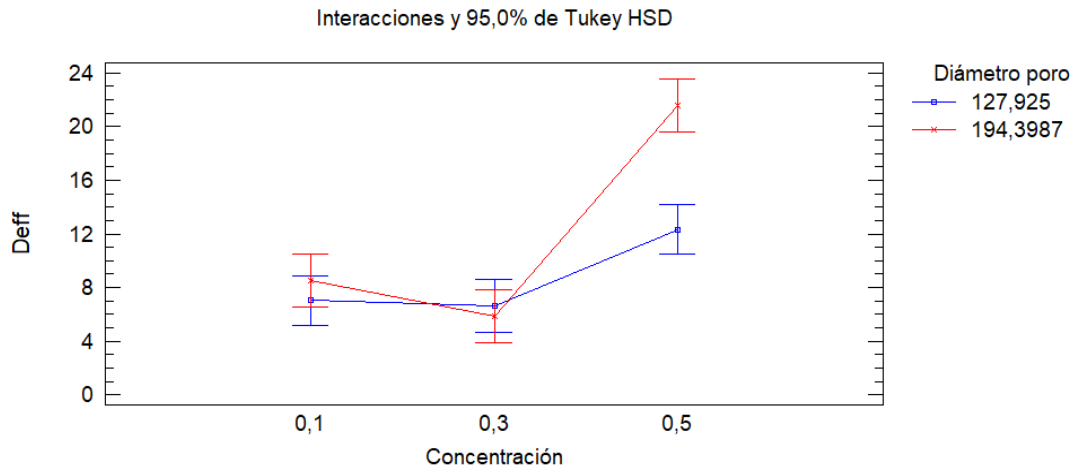
### Pruebas de Múltiple Rangos para $D_{eff}$ por Concentración

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

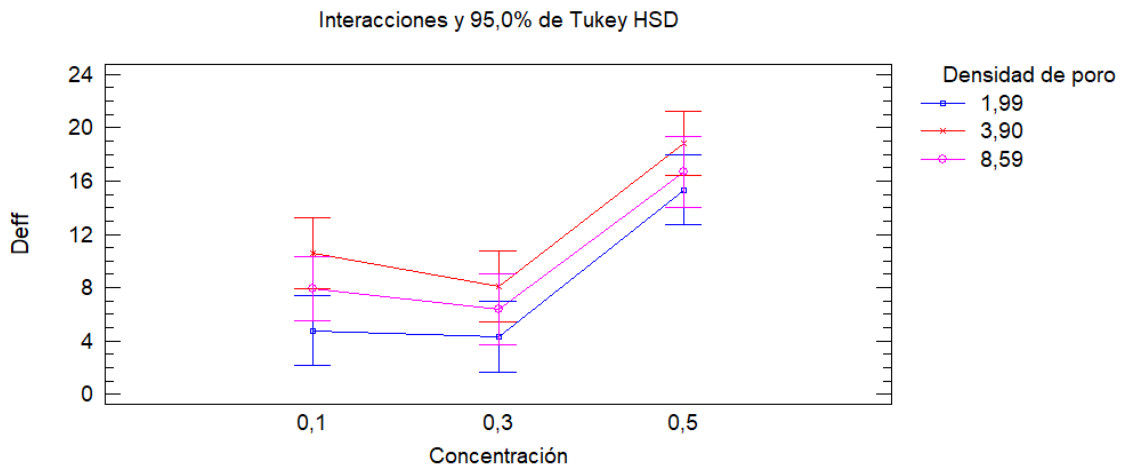
Concentración	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
0,3	12	6,255	0,637023	X
0,1	13	7,76431	0,617609	X
0,5	13	16,953	0,617609	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
0,1 - 0,3		1,50931	2,21646
0,1 - 0,5	*	-9,18873	2,1833
0,3 - 0,5	*	-10,698	2,21646

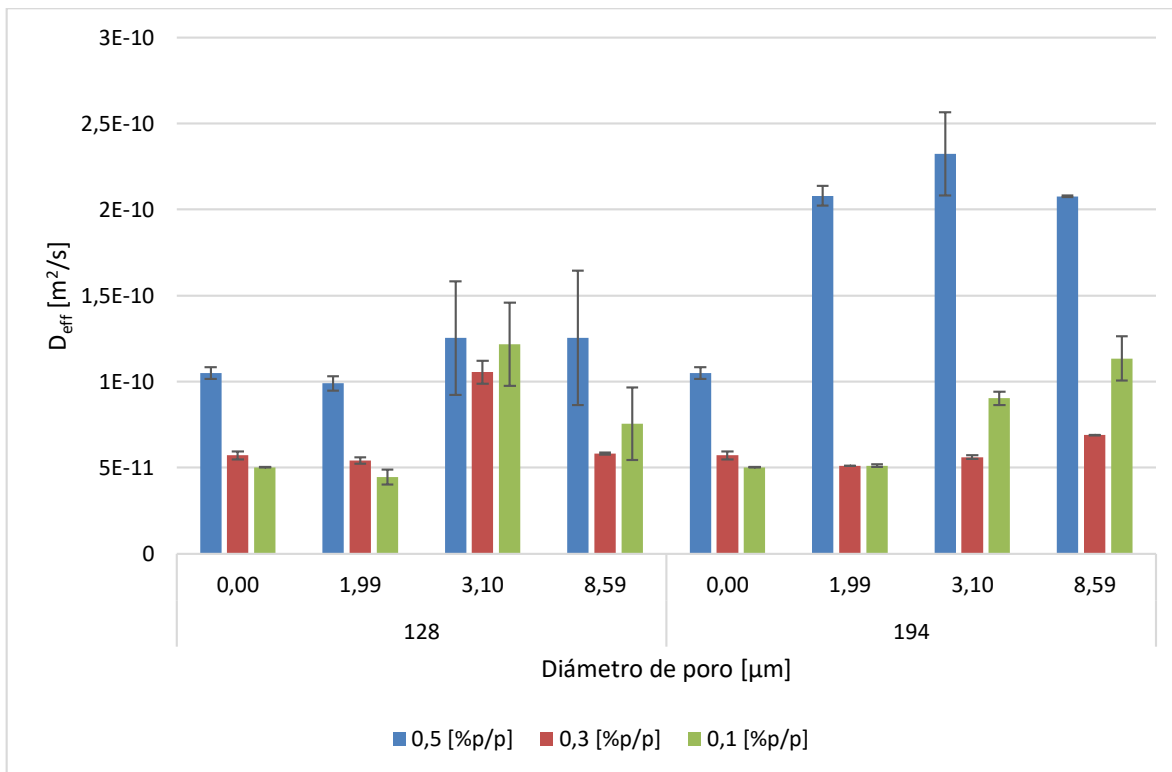
### Gráfico de interacciones para $D_{eff}$ : Diámetro de poro y Concentración



### Gráfico de interacciones para $D_{eff}$ : Densidad de poro y Concentración



### Anexo 5: "Representación gráfica de los resultados para el $D_{eff}$ ."



### Anexo 6: "Variación porcentual del $D_{eff}$ con respecto a los experimentos sin CEM"

$D_{eff}$ [ $m^2/s$ ]		Concentración NaOH : 0,5%		
Diámetro de poro [ $\mu m$ ]	Densidad de poro [poro/ $cm^2$ ]	Con CEM	Sin CEM	Variación $D_{eff}$ [%]
128	1,99	9,89	10,59	-6,6
	3,9	14,9	16,63	-10,4
	8,59	12,55	12,71	-1,3
194	1,99	20,8	19	7,9
	3,9	24,95	20,17	23,7
	8,59	20,77	20,80	-0,1

## Anexo 7: "Análisis ANOVA multivariable de textura para muestras con micro-perforaciones y sin tratamiento químico"

### Trabajo

#### Análisis de Varianza para Trabajo - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Densidad de poro	79,3187	2	39,6593	3,09	0,1196
B:Diámetro de poro	0,623534	1	0,623534	0,05	0,8329
INTERACCIONES					
AB	31,4054	2	15,7027	1,22	0,3586
RESIDUOS	77,0474	6	12,8412		
TOTAL (CORREGIDO)	188,395	11			

### Máxima Carga

#### Análisis de Varianza para Máx Carga - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Densidad de poro	5008,46	2	2504,23	11,66	0,0043
B:Diámetro de poro	2943,77	1	2943,77	13,71	0,0060
RESIDUOS	1717,72	8	214,715		
TOTAL (CORREGIDO)	9669,95	11			

#### Pruebas de Múltiple Rangos para Máx Carga por Densidad de poro

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Densidad de poro	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
1,99	4	31,245	7,32659	X
8,59	4	41,935	7,32659	X
3,9	4	78,9275	7,32659	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1,99 - 3,9	*	-47,6825	29,5562
1,99 - 8,59		-10,69	29,5562
3,9 - 8,59	*	36,9925	29,5562

\* indica una diferencia significativa.

#### Pruebas de Múltiple Rangos para Máx Carga por Diámetro de poro

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Diámetro de poro	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
127,925	6	35,04	5,98213	X
194,399	6	66,365	5,98213	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
127,925 - 194,399	*	-31,325	19,5089

## Módulo Elástico

### Análisis de Varianza para Módulo Elástico - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Densidad de poro	28,5433	2	14,2717	0,30	0,7505
B:Diámetro de poro	1023,42	1	1023,42	21,60	0,0035
INTERACCIONES					
AB	20,4013	2	10,2006	0,22	0,8123
RESIDUOS	284,325	6	47,3874		
TOTAL (CORREGIDO)	1356,69	11			

### Pruebas de Múltiple Rangos para Módulo Elástico por Diámetro de poro

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Diámetro de poro	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
127,925	6	5,96667	2,81032	X
194,399	6	24,4367	2,81032	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
127,925 - 194,399	*	-18,47	9,72502

\* indica una diferencia significativa.

## Anexo 8: “Análisis ANOVA y Prueba de Múltiples Rangos para el Trabajo”

### Análisis de Varianza para Trabajo - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Diámetro de poro	85,3323	1	85,3323	6,71	0,0167
B:Densidad poro	14,1556	2	7,0778	0,56	0,5811
C:Concentracion	455,751	2	227,875	17,92	0,0000
INTERACCIONES					
AB	52,0828	2	26,0414	2,05	0,1530
AC	1,13088	2	0,565441	0,04	0,9566
BC	109,688	4	27,422	2,16	0,1078
RESIDUOS	279,825	22	12,7193		
TOTAL (CORREGIDO)	997,966	35			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

### Pruebas de Múltiple Rangos para Trabajo por Diámetro de poro

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Diámetro de poro	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
194,399	18	4,57999	0,840612	X
127,925	18	7,65917	0,840612	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
127,925 - 194,399	*	3,07918	2,46544

\* indica una diferencia significativa.

### Pruebas de Múltiple Rangos para Trabajo por Concentración

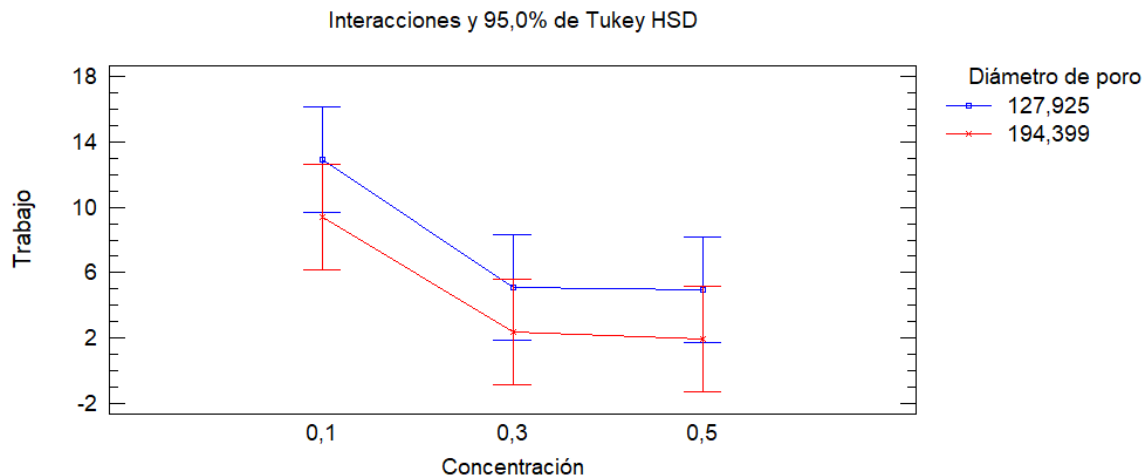
Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Concentración	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
0,5	12	3,47416	1,02954	X
0,3	12	3,73542	1,02954	X
0,1	12	11,1492	1,02954	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
0,1 - 0,3	*	7,41375	3,65884
0,1 - 0,5	*	7,67501	3,65884
0,3 - 0,5		0,261258	3,65884

\* indica una diferencia significativa.

### Gráfico de interacciones para el Trabajo: Diámetro de poro y Concentración



### Anexo 9: "Análisis ANOVA y Prueba de Múltiples Rangos para el Módulo Elástico"

#### Análisis de Varianza para Módulo Elástico - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Concentracion	774,794	2	387,397	1,62	0,2207
B:Densidad poro	477,17	2	238,585	1,00	0,3848

C:Diámetro de poro	1427,58	1	1427,58	5,97	0,0230
INTERACCIONES					
AB	978,001	4	244,5	1,02	0,4176
AC	210,855	2	105,427	0,44	0,6491
BC	1102,62	2	551,31	2,31	0,1233
RESIDUOS	5261,5	22	239,159		
TOTAL (CORREGIDO)	10232,5	35			

### Pruebas de Múltiple Rangos para Módulo Elástico por Diámetro de poro

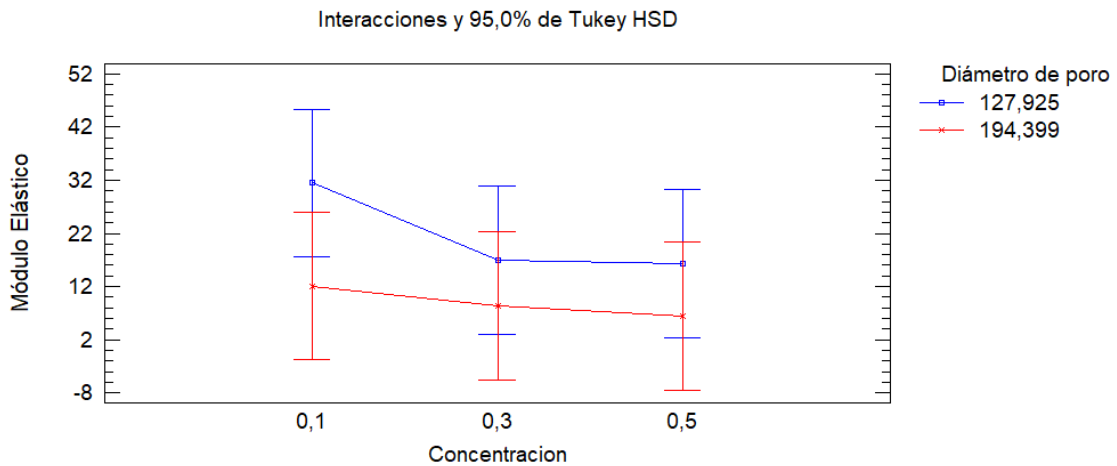
Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Diámetro de poro	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
194,399	18	8,96944	3,64508	X
127,925	18	21,5639	3,64508	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
127,925 - 194,399	*	12,5944	10,6907

\* indica una diferencia significativa.

### Gráfico de interacciones para el Módulo Elástico: Diámetro de poro y Concentración



## Anexo 10: “Análisis ANOVA y Prueba de Múltiples Rangos para la Máxima Carga”

### Análisis de Varianza para Máx Carga - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A:Diámetro de poro	2528,67	1	2528,67	7,11	0,0141
B:Densidad poro	1067,19	2	533,595	1,50	0,2450
C:Concentracion	14747,7	2	7373,87	20,73	0,0000
<b>INTERACCIONES</b>					
AB	1792,39	2	896,194	2,52	0,1034
AC	386,526	2	193,263	0,54	0,5884
BC	1827,29	4	456,822	1,28	0,3064
<b>RESIDUOS</b>					
TOTAL (CORREGIDO)	30174,5	35			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

### Pruebas de Múltiple Rangos para Máx Carga por Diámetro de poro

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Diámetro de poro	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
194,399	18	29,7528	4,44514	X
127,925	18	46,5147	4,44514	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
127,925 - 194,399	*	16,7619	13,0372

\* indica una diferencia significativa.

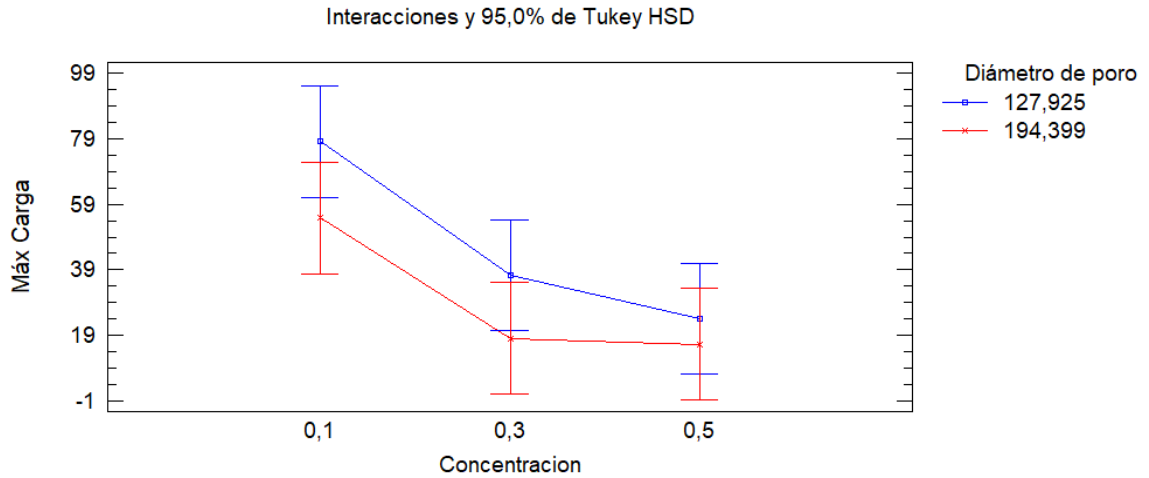
### Pruebas de Múltiple Rangos para Máx Carga por Concentración

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Concentración	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
0,5	12	20,1958	5,44417	X
0,3	12	27,7853	5,44417	X
0,1	12	66,4201	5,44417	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
0,1 - 0,3	*	38,6348	19,3479
0,1 - 0,5	*	46,2243	19,3479
0,3 - 0,5		7,58948	19,3479

## Gráfico de interacciones para la Máxima Carga: Concentración y Diámetro de poro



### Anexo 11: "Estimación de tiempo de proceso a escala industrial"

**Tabla de Difusividad Aparente de NaOH a través de la piel de tomate (Floros & Chinnan, 1990)**

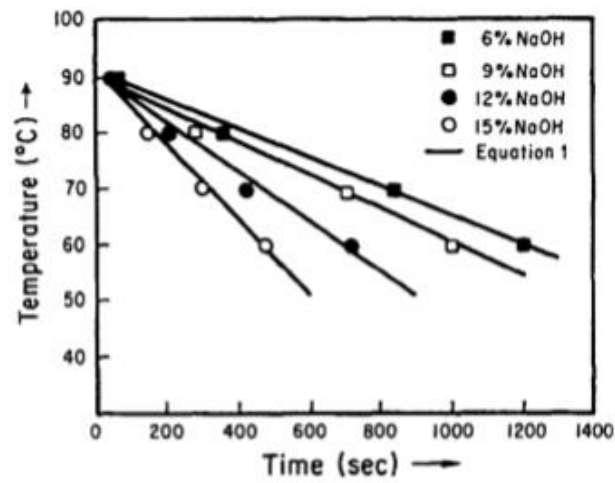
*Table 1 – Apparent diffusivity values of NaOH through tomato skin<sup>a</sup>*

Surface conc (M NaOH)	Diffusivity <sup>b</sup> (cm <sup>2</sup> /sec)	Standard deviation
1	$5.098 \times 10^{-9}$	$6.5 \times 10^{-10}$
2	$1.233 \times 10^{-8}$	$6.0 \times 10^{-10}$
3	$1.198 \times 10^{-8}$	$6.1 \times 10^{-10}$
5	$1.209 \times 10^{-8}$	$6.2 \times 10^{-10}$

<sup>a</sup> Measurements at constant temperature T = 65°C

<sup>b</sup> Mean of five replications.

**Gráfica de relación tiempo-temperatura para pelado de tomate con solución de lejía  
(Rock, Yang, Goodrich-Schneider, & Feng, 2011)**



**Fig. 8** Time-temperature relation for lye peeling of tomatoes.  
*Source:* Bayindirli [2]. Reproduced with permission from the Journal of Food Engineering