



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLAS DE HIDALGO



Facultad de Ingeniería Química

Modelo de escalamiento en el proceso de Investigación y Desarrollo (I + D) de  
una formulación sanitizante para fresa (*Fragaria x ananassa*, Duch)

TESIS

Que para obtener el grado de:

Licenciatura en Ingeniería Química

Presenta:

Ana Karen Calderón Ordaz

Asesor de Tesis:

D.C. Ma. del Carmen Chávez Parga

Coasesor de Tesis:

D.C. Mauro Manuel Martínez Pacheco

Morelia Mich., Marzo 2018

## Resumen

Modelo de escalamiento en el proceso de Investigación y Desarrollo (I + D) de una formulación sanitizante para fresa (*Fragaria x ananassa*, Duch)

**Palabras clave:** Escalamiento, modelo, prototipo sanitizante, semejanza y tanque agitado.

El escalamiento es una herramienta vital para la ingeniería, con ella se corrigen errores de diseño, antes de que un proceso se lleve a la industria. En el proceso de investigación y desarrollo (I + D) de una formulación sanitizante de interés para la industria alimenticia, se desarrolló el prototipo de un tanque agitado de 10 L bajo el principio de semejanza y reglas heurísticas que logró replicar dos formulaciones a base de almidón de papa que contenían extractos cítricos comerciales y cloruro de benzalconio como principio activo las cuales conservaron sus propiedades fisicoquímicas y microbiológicas. Se realizaron ensayos *in vitro* para determinar su efectividad como germicida con las cepas *Candida albicans* ATCC 10231, *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 y *Escherichia coli* ATCC 25025, así como, pruebas *in situ* ensayadas con el patógeno *Botrytis cinerea* spp principal causante del moho gris y responsable de pérdidas económicas en el almacenamiento de fresa. La formulación F2 presentó una mayor actividad antimicrobiana que está relacionada con el bajo contenido de almidón de dicha formulación.

## Abstract

Scaling-up is a vital tool for engineering. It can correct design errors, prior to carrying it to the industry. In the process of research and development (R & D) of a sanitizing formulation of interest for the food industry, the prototype of a stirred tank of 10 L was developed according to the principle of similarity and the heuristic rules that achieved the replication of two formulations based on potato starch with commercial citrus extracts and benzalkonium chloride as active ingredient, the formulations retained their physicochemical and microbiological properties. In vitro tests were carried out to determine its effectiveness as germicide with the strains *Candida albicans*, *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* as well as *in situ* tests with the pathogen *Botrytis cinerea*, the main cause of gray mold and responsible for economic losses in strawberry storage. Formulation F2 showed a higher antimicrobial activity that is related to the low starch content of said formulation.

## Dedicatoria

A mis padres:

Laura Alicia Ordaz Adame

José Manuel Calderón Bucio

### ***No abandones la esperanza***

*“La esperanza te da la fuerza para seguir Adelante cuando sientas que ya nada te importa. Nunca dejes de creer en ti... Mientras creas que puedes lograrlo, tendrás un motivo para intentarlo. No dejes que nadie retenga tu felicidad en sus manos; sujétala en las tuyas, para que siempre esté cerca de ti.*

*No midas el éxito ni el fracaso por los bienes materiales sino por cómo te sientes; nuestros sentimientos determinan la riqueza de nuestras vidas. No dejes que los malos momentos te agobien; ten paciencia y todos pasarán. Nuca dudes en buscar ayuda; todos la necesitamos de vez en cuando. No huyas del amor sino ve hacia el amor, porque es nuestra más profunda alegría.*

*No esperes que lo que deseas venga a ti; búscalo con toda tu alma, sabiendo que la vida te encontrará a la mitad del camino. No sientas que has perdido cuando tus planes y sueños no alcanzan a cumplir tus anhelos. Cada vez que aprendes algo nuevo sobre ti o sobre la vida, has avanzado. No hagas nada que disminuya tu propio respeto. El estar satisfecho con uno mismo es esencial para estar satisfecho con la vida. Nunca olvides de reír ni dejes que el orgullo te impida llorar. Cuando reímos y lloramos es cuando vivimos a plenitud”.*

- Nancye Sims

## Índice

Resumen .....	i
Dedicatoria.....	ii
Lista de tablas .....	v
Lista de figuras .....	vi
Agradecimiento.....	vii
Glosario .....	viii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Investigación y desarrollo.....	1
1.1.1 Etapas a considerar en los trabajos de investigación y desarrollo.....	1
1.2 Agitación de líquidos .....	2
1.2.1 Definición.....	2
1.2.2 Tanques agitados.....	2
1.2.3 Propósitos de la agitación.....	3
1.3 Escalamiento.....	3
1.3.1 Definición.....	3
1.3.2 Origen e historia del escalamiento. ....	3
1.3.3 Problemas que surgen en el escalamiento.....	4
1.3.4 Técnicas en el proceso de escalamiento.....	5
1.4 Modelos y prototipos .....	5
1.5. Principio de semejanza .....	6
1.5.1 Semejanza geométrica.....	6
1.5.2 Semejanza mecánica. ....	8
1.5.2.1 Semejanza estática.....	8
1.5.2.2 Semejanza cinemática. ....	9
1.5.2.3 Semejanza dinámica. ....	10
1.5.3 Semejanza térmica.....	10
1.5.4 Semejanza química.....	10
1.5.5 Criterios de semejanza. ....	10
1.5.6 Obtención de los criterios de semejanza.....	11
1.5.6.1 Análisis dimensional. ....	11
1.5.6.1.1 Teorema <i>II</i> de Buckingham. ....	11
1.6 Fresa.....	12

1.6.1. Cultivo de fresa en México. ....	12
1.6.2. Patógenos que parasitan la fresa.....	13
1.7 Sanitizante.....	13
Capítulo 2. Antecedentes.....	14
2.1. Justificación.....	14
2.2. Hipótesis.....	14
2.3 Objetivo general.....	14
2.4 Objetivos particulares.....	15
Capítulo 3. Metodología.....	16
3.1. Escalamiento de la formulación.....	16
3.2. Análisis fisicoquímicos.....	17
3.2.1. Densidad.....	17
3.2.2. Viscosidad.....	18
3.3. Análisis microbiológicos.....	19
3.3.1. Ensayos <i>in vitro</i> .....	19
3.3.2. Ensayos <i>in situ</i> .....	20
3.4. Simulación.....	23
3.5. Análisis estadístico.....	23
Capítulo 4. Resultados.....	24
Capítulo 5. Análisis de resultados.....	46
Capítulo 6. Resumen de resultados.....	49
Capítulo 7. Conclusiones.....	50
Capítulo 8. Sugerencias para trabajos futuros.....	51
Capítulo 9. Bibliografía.....	52
Capítulo 10. Apéndices.....	55
I Escala de McFarland (Densidad Óptica D.O. de 0.5).....	55
II Cuantificación de esporas en cámara de Neubauer.....	55
III Certificados de análisis microbiológicos.....	57

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Influencia del tamaño en los mecanismos clave en los procesos químicos.....	5
<b>Tabla 2.</b> Efecto de las dimensiones geométricas. ....	8
<b>Tabla 3.</b> Proporciones de las microdiluciones para los tratamientos <i>in vitro</i> . ....	20
<b>Tabla 4.</b> Tratamientos control, preventivos y curativos para el ensayo <i>in situ</i> .....	21
<b>Tabla 5.</b> Variables físicas en sus dimensiones fundamentales. ....	24
<b>Tabla 6.</b> Acomodo de los parámetros adimensionales.....	25
<b>Tabla 7.</b> Dimensiones de los tanques propuestos en el proceso de escalamiento. ....	32
<b>Tabla 8.</b> Resultados de las relaciones de diseño de los diferentes tanques agitados. ....	34
<b>Tabla 9.</b> Densidad de las dos formulaciones a las diferentes escalas. ....	35
<b>Tabla 10.</b> Viscosidad de las dos formulaciones a las diferentes escalas. ....	36
<b>Tabla 11.</b> Conteo de células sobrevivientes a diferentes escalas. ....	36
<b>Tabla 12.</b> Porcentaje de reducción de carga microbiana a diferentes escalas. ....	37
<b>Tabla 13.</b> Efecto de los tratamientos a diferentes temperaturas ....	38
<b>Tabla 14.</b> Características hidrodinámicas. ....	45
<b>Tabla 15.</b> Parámetros del vórtice. ....	45
<b>Tabla 16.</b> Características del flujo tangencial.....	45

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Etapas de investigación y desarrollo en el proceso de ingenierización. ....	1
<b>Figura 2.</b> Tanque típico del proceso con agitación.....	2
<b>Figura 3.</b> La Ingeniería Química como eslabón en la industria.....	4
<b>Figura 4.</b> Semejanza geométrica.....	7
<b>Figura 5.</b> Tipos de semejanza geométrica. ....	8
<b>Figura 6.</b> Semejanza cinemática. ....	9
<b>Figura 7.</b> Partes de la planta de fresa. ....	12
<b>Figura 8.</b> Picnómetro para líquidos de baja viscosidad. ....	18
<b>Figura 9.</b> Viscosímetro de Ostwald. ....	18
<b>Figura 10.</b> Cultivos en placa de las cepas ensayadas.....	19
<b>Figura 11.</b> Esporas de <i>B. cinerea</i> pps por microscopía óptica a 10x.....	20
<b>Figura 12.</b> Color de los estados de maduración de la fresa. ....	23
<b>Figura 13.</b> Dimensiones de un tanque a escala.....	31
<b>Figura 14.</b> Las formulaciones a diferentes escalas. ....	37
<b>Figura 15.</b> Imágenes representativas de los tratamientos .....	38
<b>Figura 16.</b> Índice de decaimiento en fresa almacenada a diferentes temperaturas.....	39
<b>Figura 17.</b> Parámetros de color durante el periodo de almacenamiento de la fresa a 4 °C .....	40
<b>Figura 18.</b> Tipos de tanques.....	41
<b>Figura 19.</b> Tipos de impulsores .....	42
<b>Figura 20.</b> Tipos de deflectores .....	42
<b>Figura 21.</b> Tanque y especificaciones de diseño .....	43
<b>Figura 22.</b> Impulsor y especificaciones de diseño.....	43
<b>Figura 23.</b> Selección del deflector y especificaciones de diseño.....	44
<b>Figura 24.</b> Tanque P3 modelado.....	44
<b>Figura 25.</b> Perfil de velocidad. ....	45
<b>Figura 26.</b> Cámara de Neubauer.....	56

## **Agradecimientos**

A la Benemérita y Centenaria Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo que abrió sus puertas del conocimiento para mí, así como, las facilidades para concluir exitosamente mi estudios en la Licenciatura en Ingeniería Química, carrera que representaré con vocación, ética, compromiso y pasión para el bien de mi persona y mi país.

A la Facultad de Ingeniería Química en cuyas instalaciones recibí la instrucción, cultura y formación, así como, a sus profesores que transmitieron en mí su disciplina, sabiduría y conocimiento para portar con orgullo el título de Ingeniero Químico. Facultad que me brindó su confianza para hacerme participe en su programa de acreditación y mejora continua que me permitirá devolver a la sociedad lo mucho que se me ha dado.

A la empresa Saporis Comercial S.A. de C.V. quién me brindó la confianza para crecer académica y profesionalmente al darme la oportunidad de interactuar con sus empleados haciéndome participe de sus actividades diarias en un ambiente laboral íntegro y respetuoso.

A el Instituto de Investigaciones Químico Biológicos quien me acogió en sus instalaciones donde llevé a cabo el trabajo de investigación para el planteamiento y defensa de esta tesis.

## Glosario

**Agitación:** Movimiento inducido de un material en una manera específica dentro de un contenedor.

**Análisis microbiológicos:** Inspección de alimentos o sustancias por medio de ensayos que permiten detectar la presencia de patógenos.

**Densidad:** Magnitud escalar referida como la cantidad de masa en un determinado volumen a una temperatura dada.

**Escalamiento:** Cambio de escala en el proceso de investigación y desarrollo mediante el cual se desarrollan los criterios y las reglas de asignación numérica con un conjunto de técnicas, metodologías y procedimientos que permiten transferir a escala industrial los datos obtenidos en los experimentos a escala reducida.

**Fresa:** Planta rastrera, herbácea, perenne, de pequeña altura, de raíz fasciculada, tallos poco visibles y hojas trifoliadas.

**Modelo:** Abstracción que está concebida para predecir la funcionalidad de un prototipo.

**Patógeno:** Microorganismo capaz de causar enfermedades, si está presente en cantidad suficiente y condiciones favorables.

**Prototipo:** Sistema físico a escala completa, que va a ser modelado.

**Sanitizante:** Sustancias que reducen el número de microorganismos a un nivel seguro, capaces de eliminar el 99.999 % de una población bacteriana sometida a un ensayo en un tiempo no mayor a 30 s.

**Semejanza:** La condición de dos o más sistemas en los cuales hay una relación constante entre las cantidades correspondientes. La semejanza puede ser geométrica, mecánica, térmica o química.

**Semejanza cinemática:** Condición de sistemas semejantes geoméricamente en los cuales las partículas correspondientes describen trayectorias semejantes geoméricamente en intervalos de tiempos correspondientes.

**Semejanza dinámica:** Condición de sistemas en movimiento, semejantes geoméricamente, en los cuales son iguales las relaciones entre las fuerzas correspondientes.

**Semejanza estática:** Condición de cuerpos o estructuras semejantes geoméricamente, sometidas a tensión constante, sufren deformaciones elásticas que permanecen geoméricamente semejantes y por lo tanto las relaciones de los desplazamientos correspondientes son iguales a la relación de escala.

**Semejanza geométrica:** La condición de dos cuerpos o espacios en los cuales para cada punto de uno existe un punto correspondiente en el otro.

**Semejanza mecánica:** Término genérico que engloba las semejanzas estática, cinemática y dinámica.

**Semejanza química:** Condición de sistemas semejantes geoméricamente, cinemáticamente y térmicamente, en los cuales las diferencias de concentración correspondientes mantienen una relación constante entre sí.

**Semejanza térmica:** La condición de sistemas semejantes geoméricamente en los cuales la relación de diferencias de temperaturas correspondientes es constante y si están en movimiento, son cinemáticamente semejantes.

**Viscosidad:** Resistencia al desplazamiento producida por el efecto de corte, el cual se genera por la fricción interna de las moléculas de una capa de fluido al deslizarse sobre otra.

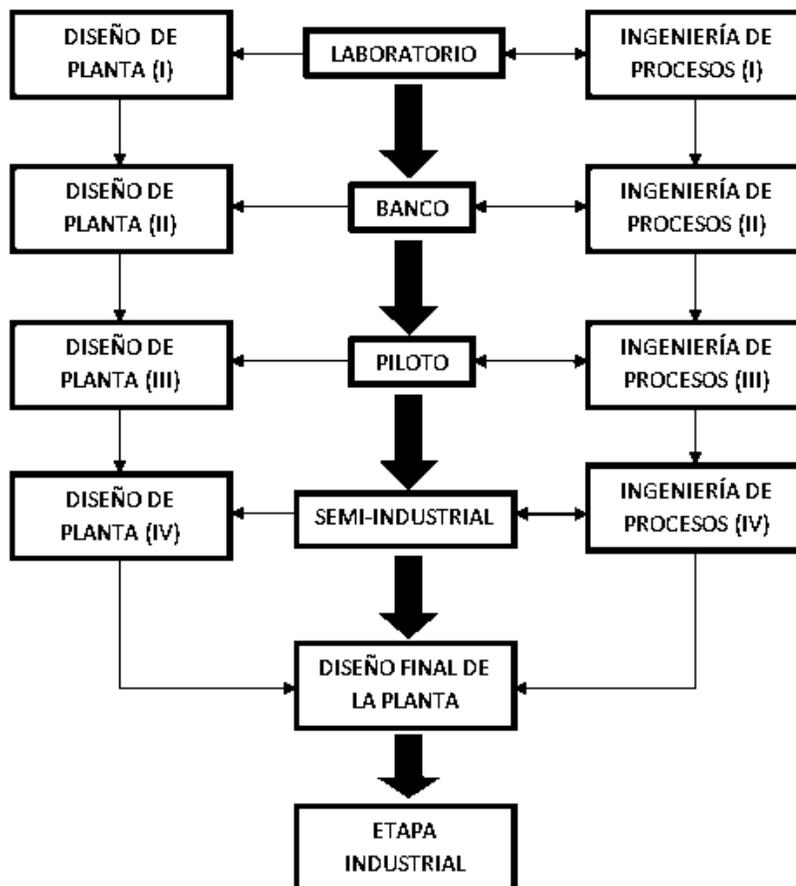
## Capítulo 1. Introducción

### 1.1 Investigación y desarrollo

La investigación y desarrollo (I+D) de nuevos productos o tecnologías tiene como desafío escalar los conocimientos logrados en el laboratorio hasta lograr la exitosa puesta en marcha y operación económica a escala comercial (Modificado de Gonzalez, 2000).

#### 1.1.1 Etapas a considerar en los trabajos de investigación y desarrollo.

El proceso de I + D puede considerarse dividido en cinco etapas, niveles o escalas: laboratorio, banco, piloto, semi-industrial e industrial como se muestra en la Figura 1 (González, 2000).



*Figura 1.* Etapas de investigación y desarrollo en el proceso de ingenierización.

El proceso de escalamiento, desde su etapa laboratorio hasta su escala industrial, es largo, costoso y debe ser reducido en todo lo posible con el fin de acortar el tiempo que media entre la concepción de un producto y su introducción al mercado. Por lo que, si el proceso es lo suficientemente conocido y sus características lo permiten, puede pasar directamente de la escala de laboratorio a la escala industrial (González, 2000).

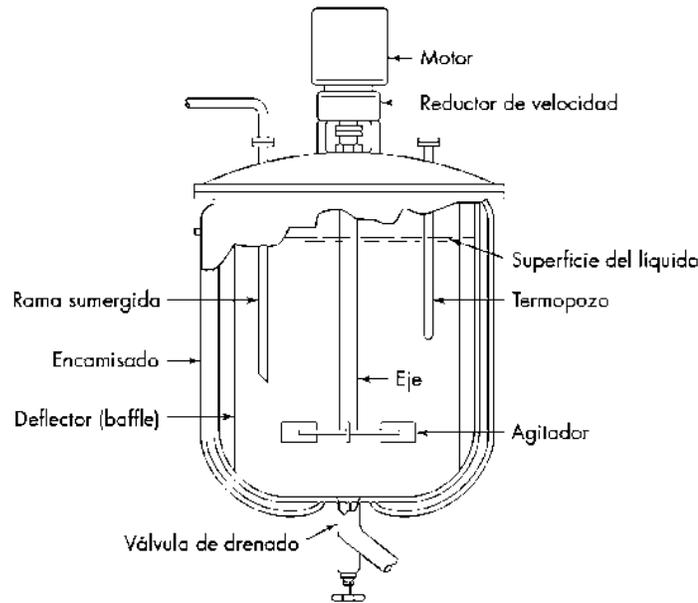
## 1.2 Agitación de líquidos

### 1.2.1 Definición.

La agitación es el movimiento inducido de un material en una manera específica (en un patrón circulatorio) dentro de un contenedor (McCabe *et al.*, 2007).

### 1.2.2 Tanques agitados.

Los tanques agitados están provistos de un tanque o recipiente de forma cilíndrica generalmente con un eje vertical. La parte superior del tanque puede estar cerrada o abierta al aire. Las proporciones del tanque varían y dependen de la naturaleza del problema de agitación. Sin embargo, en muchas situaciones se utiliza un diseño estandarizado ver Figura 2 (McCabe *et al.*, 2007).



**Figura 2.** Tanque típico del proceso con agitación.

### **1.2.3 Propósitos de la agitación.**

Los líquidos se agitan dependiendo de los objetivos de la etapa del proceso (McCabe *et al.*, 2007). Dichos propósitos incluyen:

1. Suspensión de partículas sólidas.
2. Mezclado de líquidos miscibles.
3. Dispersión de un gas a través de un líquido en forma de pequeñas burbujas.
4. Dispersión de un segundo líquido, inmisible con el primero, para formar una emulsión o suspensión de gotas finas.
5. Promoción de la transferencia de calor entre el líquido y un serpentín o encamisado.

## **1.3 Escalamiento**

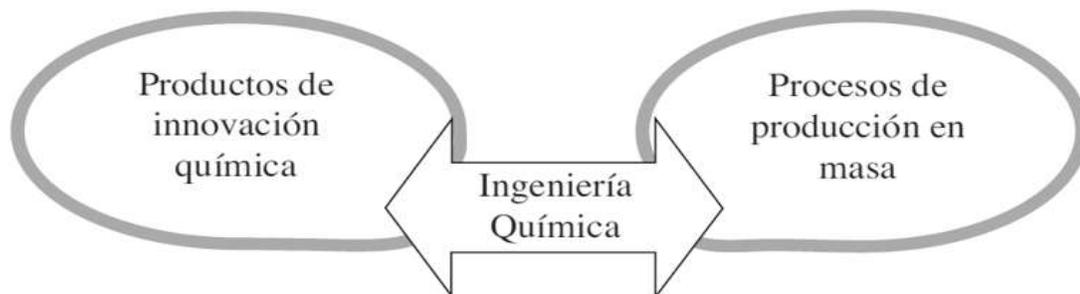
### **1.3.1 Definición.**

El escalamiento es el proceso mediante el cual se desarrollan los criterios y las reglas de asignación numérica que determinan las unidades de medida significativas mediante un conjunto de técnicas, metodologías y procedimientos que permiten transferir a escala industrial los datos obtenidos en los experimentos a escala reducida (Anaya-Durand y Pedroza-Flores, 2008). En su concepción más simple, el concepto de escalamiento se refiere al paso de una escala a otra, durante el proceso de investigación y desarrollo (I + D) de un nuevo producto o tecnología (González, 2000).

### **1.3.2 Origen e historia del escalamiento.**

El escalamiento en un principio se entendió como el simple hecho de hacer las cosas más grandes. A finales del siglo XIX, los químicos alemanes, capaces de producir en el laboratorio sustancias de gran valor comercial e incluso político no eran capaces de reproducirlos a gran escala con la misma calidad, rendimiento y pureza. Cambiar los matraces por reactores no era suficiente para producir grandes masas y rendimientos; se dieron cuenta que escalar una reacción química del laboratorio a nivel industrial requería de un conocimiento mayor al de la simple química. El método Haber-Bosch, para la síntesis de amoníaco demostró dicha afirmación al integrar en su proceso las características tanto físicas como químicas de la

reacción, así como, el equipo necesario para realizarla. Desde entonces la ingeniería química demuestra que es necesario integrar a la física y a la química para el escalamiento de procesos (Anaya-Durand y Pedroza-Flores, 2008).



*Figura 3.* La Ingeniería Química como eslabón en la industria.

### 1.3.3 Problemas que surgen en el escalamiento.

En el proceso de cambio de escala surgen problemas que en ocasiones son ignorados completa o parcialmente, lo que genera fracasos. Estos problemas pueden ser agrupados en dos tipos, los que se relacionan con la necesidad de manejar grandes volúmenes de material y aquellos en que la naturaleza misma del proceso afecta el tamaño de escala (Wiseman, 1998). Dos problemas se relacionan para el primer caso. El cambio de reactivos grado analítico por reactivos grado comercial y el cambio de material de laboratorio por equipos complejos y costosos, por ejemplo, equipos de enfriamiento, calentamiento y tratamiento de residuales. Para el segundo caso, el tamaño de la unidad influye de forma indirecta con los parámetros del proceso, por ejemplo, la reacción química es independiente del tamaño, sin embargo la misma es influenciada por los procesos físicos, como la transferencia de masa y calor, las cuales son controladas por el tamaño ver Tabla 1 (Palluzi y Matty, 1983; González, 2000).

**Tabla 1.** Influencia del tamaño en los mecanismos clave en los procesos químicos.

<b>Mecanismo</b>	<b>VARIABLES importantes</b>	<b>Influencia del tamaño</b>
Cinética Química	T, C y P	Ninguna
Termodinámica	T, C y P	Ninguna
Transferencia de calor	Calor transferido, P y C	Importante
Transferencia de masa	T, C y $N_{Re}$	Importante
Convección forzada	Flujo y Geometría	Importante
Convección natural	T, C, P y Geometría	Determinante

### 1.3.4 Técnicas en el proceso de escalamiento.

Las técnicas de escalamiento tienen por objetivo reducir el tiempo de I+D, por ello se recurre a ensayos donde se integran modelos que permiten reproducir en el laboratorio los procesos de interés, los cuales son determinantes en las consideraciones técnicas y económicas. La computación y simulación son elementos fundamentales para el registro, desarrollo y evaluación de modelos matemáticos al igual que los datos obtenidos experimentalmente. Esto reduce el número de experimentos y etapas de escalamiento.

Lo ideal sería que esto se realizara de manera teórica, sin la necesidad de experimentar, con la aplicación de leyes físicas, químicas y la resolución de ecuaciones diferenciales que describen los procesos. Sin embargo, en la práctica esto no siempre es posible, ya que en ocasiones se conocen las ecuaciones diferenciales que describen los procesos de interés, pero su integración no se puede realizar.

## 1.4 Modelos y prototipos

Un modelo es una abstracción que es concebida para predecir la funcionalidad de un prototipo. El prototipo a su vez, es el sistema físico a escala completa, que va a ser modelado (Perry *et al.*, 1989). El prototipo no necesariamente tiene que existir antes de su modelo teórico. Lo determinante en el trabajo con modelos y prototipos es la relación que existe entre el comportamiento de una escala y otra (González, 2000). Cuando se describe el modelo de un prototipo aún inexistente, se debe tener en cuenta el tipo y forma de la unidad a escalar (Jonstone y Thring, 1957).

La modelación matemática aplica a modelos homólogos como analógicos, ya sea como método único de escalamiento en los casos que existe suficiente información o en conjunto con el principio de semejanza.

### **1.5. Principio de semejanza**

En modelos homólogos se aplica y se relaciona con el concepto general de forma donde se destaca: el tamaño, la configuración externa y la composición química (Anaya-Durand y Pedroza-Flores, 2008). El principio de semejanza establece que la configuración espacial y temporal de un sistema físico, se determina por relaciones de magnitud dentro del sistema mismo y no depende del tamaño ni de las unidades de medida (Jonstone y Thring, 1957). Las relaciones de magnitud se determinan de dos maneras: por proporciones intrínsecas o factores de escala. (González, 2000).

Los cuatro tipos de semejanza con importancia en la ingeniería química son:

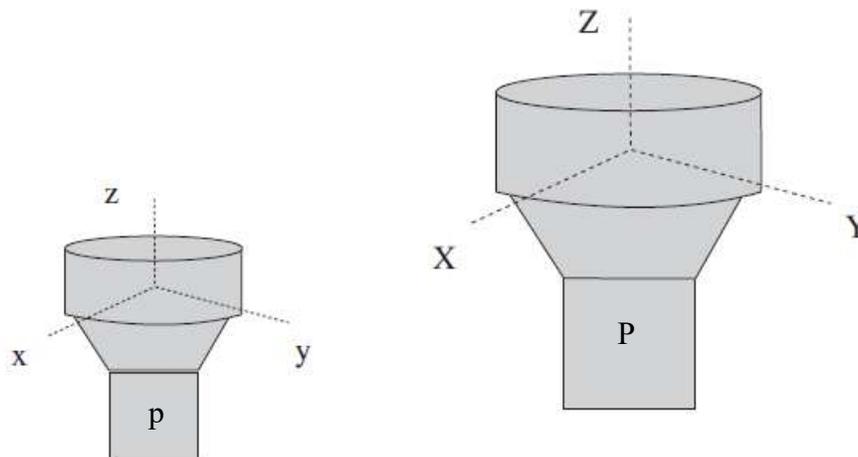
1. Semejanza geométrica (dimensiones proporcionales)
2. Semejanza mecánica:
  - Semejanza estática (deformaciones proporcionales)
  - Semejanza cinemática (tiempos proporcionales)
  - Semejanza dinámica (fuerzas proporcionales)
3. Semejanza térmica (temperaturas proporcionales)
4. Semejanza química (concentraciones proporcionales)

#### **1.5.1 Semejanza geométrica.**

En términos de correspondencia se define como: dos cuerpos son geoméricamente semejantes cuando para cada uno de ellos existe al menos un punto correspondiente en el otro (Jonstone y Thring, 1957). En la semejanza geométrica el factor de escala  $L$ , relaciona las distintas dimensiones lineales de un sistema con las de otro sistema homólogo donde cada uno de los cuerpos está provisto de tres ejes imaginarios (González, 2000). En el punto  $P$  (dentro del cuerpo de mayor tamaño) con sus coordenadas  $X, Y, Z$  y el punto  $p$  (dentro del cuerpo de menor tamaño), cuyas coordenadas son  $x, y, z$  como se muestra en la Figura 4. Si ambos están relacionados se cumple con la ecuación:

$$L = \frac{X}{x} = \frac{Y}{y} = \frac{Z}{z}$$

Donde la relación o factor de escala lineal  $L$  es constante, entonces se puede decir que esos dos puntos y todos los otros pares de puntos cuyas coordenadas espaciales estén similarmente relacionadas en términos de  $L$ , son puntos correspondientes. (Anaya-Durand y Pedroza-Flores, 2008)



**Figura 4.** Semejanza geométrica.

A pequeña y gran escala la aplicación de estos conceptos geométricos tienen un efecto significativo como se muestra en la Tabla 2 (Trambouze, 1979). Para plantas de procesos se sugieren diferentes tipos de aparatos que podrían ser considerados semejantes a los aparatos de gran escala. Entonces, una réplica tiene semejanza geométrica si las relaciones de escala son iguales en todas las direcciones o semejanza geométrica distorsionada, si las relaciones de escala son diferentes en algunas de las direcciones como se muestra en la Figura 5 (González, 2000).

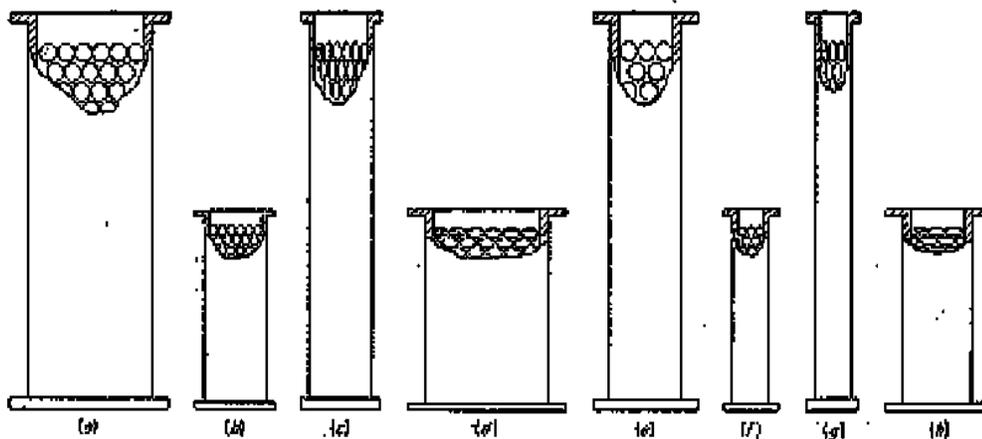


Figura 5. Tipos de semejanza geométrica.

Tabla 2. Efecto de las dimensiones geométricas.

Dimensiones Geométricas			
Mecanismo	Volumen ( $\propto DH^2$ )	Razón (H/D)	Superficie lateral/volumen ( $\propto D^{-1}$ )
Reacción química	Directo	Indirecto	Indirecto
Transferencia de masa	Indirecto	Directo	Indirecto
Transferencia de calor	Indirecto	Directo	Directo

### 1.5.2 Semejanza mecánica.

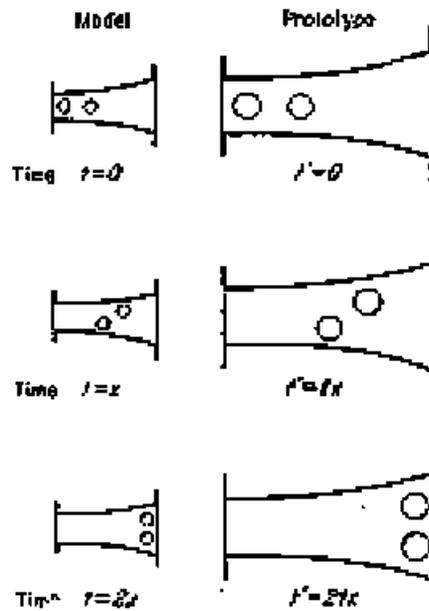
Se considera como una extensión del concepto de semejanza geométrica aplicada a los sistemas estacionarios o en movimiento, bajo la influencia de fuerzas (Johnstone y Thring, 1957). Según el tipo de sistemas y de fuerzas, ésta semejanza puede ser estática, cinemática o dinámica (Anaya-Durand y Pedroza-Flores, 2008).

#### 1.5.2.1 Semejanza estática.

Se relaciona con los cuerpos sólidos o estructuras sometidas a tensiones constantes (Anaya-Durand y Pedroza-Flores, 2008). Todos los cuerpos sólidos se deforman bajo tensión y como resultado de ello, ciertas partes llegan a ser desplazadas de la posición que ocupaban cuando no estaban sometidas a tensión (González). Dos cuerpos geoméricamente semejantes son semejantes estáticamente cuando ante tensiones constantes, sus deformaciones relativas son tales que permanecen geoméricamente semejantes (Johnstone y Thring, 1957).

**1.5.2.2 Semejanza cinemática.**

Se relaciona con sólidos o sistemas fluidos en movimiento, lo que añade la dimensión del tiempo a las tres coordenadas espaciales (Anaya-Durand y Pedroza-Flores, 2008). Los sistemas en movimiento semejantes geoméricamente son cinemáticamente semejantes, cuando las partículas correspondientes trazan trayectorias semejantes, en intervalos de tiempo correspondientes como se aprecia en la Figura 6 (Johnstone y Thring, 1957). La semejanza cinemática es de particular interés, porque si dos sistemas de fluidos son geoméricamente semejantes, entonces los patrones de flujo también lo serán y las variaciones con respecto al tiempo de la transferencia de calor y masa en los dos sistemas, conformarán una relación simple entre sí.



**Figura 6.** Semejanza cinemática.

### ***1.5.2.3 Semejanza dinámica.***

Se relaciona con las fuerzas correspondientes (fuerzas de una misma clase que actúan sobre partículas correspondientes en tiempos correspondientes) que aceleran o retardan masas en movimientos en sistemas dinámicos; gravitacional, centrífuga, etc., (Anaya-Durand y Pedroza-Flores, 2008). Los sistemas en movimiento geoméricamente semejantes son dinámicamente semejantes cuando las relaciones entre todas las fuerzas correspondientes son iguales (Johnstone y Thring, 1957).

### **1.5.3 Semejanza térmica.**

Refiere con los sistemas en los cuales hay un flujo de calor, el cual puede fluir de un punto a otro por radiación, convección, conducción y por la acción de un gradiente de presión (Anaya-Durand y Pedroza-Flores, 2008). Para los primeros tres procesos se requiere un diferencial de temperatura. La semejanza térmica requiere que las razones de cambio correspondientes con los flujos de calor mantengan una relación constante entre sí (González, 2000). Los sistemas geoméricamente semejantes son térmicamente semejantes cuando las relaciones entre las diferencias de temperatura son constantes (Johnstone y Thring, 1957).

### **1.5.4 Semejanza química.**

Se relaciona con sistemas en los que se desarrollan reacciones químicas (Anaya-Durand y Pedroza-Flores, 2008), en las que hay uno o más parámetros de concentración, que dependen del número de compuestos químicos. No es necesario que la composición química en los dos sistemas sea la misma, pero, debe existir una relación fija entre las concentraciones puntuales de los compuestos que son comparados. Los sistemas semejantes geométrica y térmicamente son semejantes químicamente cuando las diferencias de concentraciones se mantienen constantes entre ellas y cuando dichos sistemas, si están en movimiento, son cinemáticamente semejantes (Johnstone y Thring, 1957).

### **1.5.5 Criterios de semejanza.**

Las definiciones de semejanza en los distintos sistemas de interés conllevan, en todos los casos, al planteamiento de las condiciones necesarias para la existencia de semejanza entre los

sistemas comparados. Los criterios son relaciones expresadas como igualdades entre razones de magnitudes correspondientes dentro del mismo sistema, por medio de grupos adimensionales (Johnstone y Thring, 1957).

### **1.5.6 Obtención de los criterios de semejanza.**

La semejanza química, térmica o mecánica entre sistemas geoméricamente semejantes se pueden especificar en términos de criterios, generalmente adimensionales y existen dos métodos generales de obtenerlos (Johnstone y Thring, 1957).

- Por análisis dimensional, cuando son desconocidas las ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento de un sistema, pero se conocen todas las variables que deben entrar en dichas ecuaciones diferenciales.
- Por derivación de ecuaciones diferenciales, cuando éstas se conocen pero no pueden ser integradas en su totalidad.

En los casos en que se conozcan las ecuaciones diferenciales y además éstas se pueden integrar y resolver, no hay necesidad de los criterios de semejanza ni de los experimentos con modelos, puesto que el comportamiento del sistema a gran escala puede ser directamente calculable.

#### ***1.5.6.1 Análisis dimensional.***

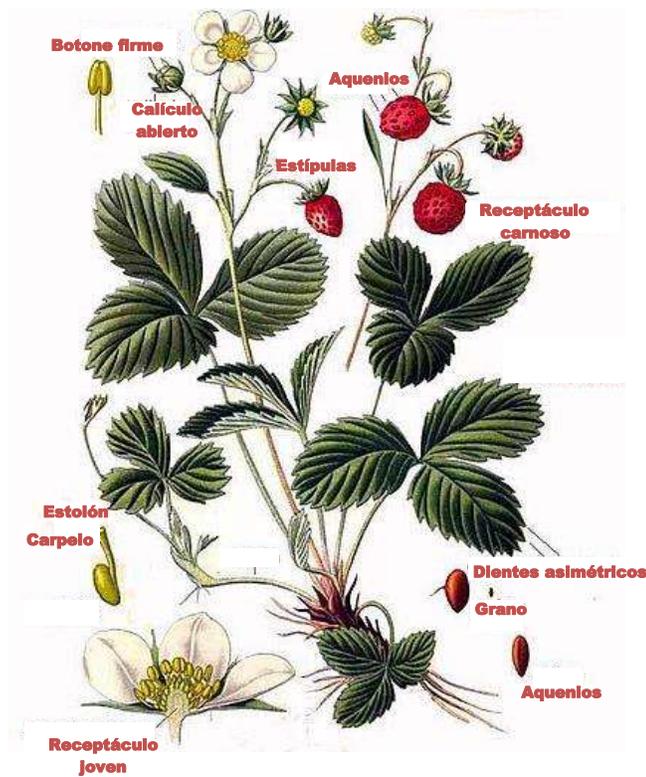
El análisis dimensional es una técnica para expresar el comportamiento de un sistema físico en términos de un número mínimo de variables independientes y en una forma tal que no resulten afectadas por los cambios de las magnitudes de las unidades de medidas (González, 2000). Para obtener los criterios de semejanza a partir del Análisis Dimensional, se utilizan dos métodos distintos: el Teorema  $\pi$  de Buckingham y el método de Rayleigh. La aplicación de estos métodos se puede consultar en Johnstone y Thring, 1957 y Perry y Green, 1986.

##### ***1.5.6.1.1 Teorema $\Pi$ de Buckingham.***

Existe un número fijo de parámetros adimensionales independientes para un problema dado y es igual a la diferencia entre el número total de variables menos el número de dimensiones fundamentales (Buckingham, 1914).

## 1.6 Fresa

La fresa (*Fragaria x ananassa*, Duch), es una planta rastrera, herbácea, perenne, de pequeña altura, de raíz fasciculada, tallos poco visibles y hojas trifoliadas (Figura 7), perteneciente a la familia de las Rosáceas (modificado de Hernández-Romero, 2006).



**Figura 7.** Partes de la planta de fresa.

Las fresas son percederas, susceptibles a la pérdida de humedad, formación de magulladuras y decaimiento poscosecha (Ferreira *et al.*, 2008).

### 1.6.1. Cultivo de fresa en México.

El cultivo de la fresa en México inició a mediados del siglo pasado en el estado de Guanajuato. Sin embargo, en 1950 la demanda obtuvo importancia en los Estados Unidos de América (EUA) lo cual originó que el cultivo de dicho fruto se extendiera a Michoacán de Ocampo (Ávila-Arce y González-Milán, 2012).

México es el tercer productor mundial de fresa, con una producción anual que supera las 392 mil toneladas. El estado mexicano Michoacán de Ocampo es el principal estado productor de fresa. El cual aporta el 68.7 % de la producción nacional seguido por Baja California Norte y Guanajuato (SAGARPA, 2017).

### **1.6.2. Patógenos que parasitan la fresa**

El moho gris (*B. cinerea*) es el principal causante de pérdidas económicas en el almacenamiento de fresa (Reddy *et al.*, 2000). Este patógeno puede ser controlado por métodos físicos y químicos, por ejemplo, almacenamiento a bajas temperaturas y ambientes ricos en CO<sub>2</sub>, así como la aplicación de fungicidas, este último es el más usado y el más efectivo (Reddy *et al.*, 1998; Tokarsky *et al.*, 2015).

### **1.7 Sanitizante**

Los sanitizantes son sustancias que reducen el número de microorganismos a un nivel seguro, capaces de eliminar el 99.999 % de una población bacteriana sometida a un ensayo en un tiempo no mayor a 30 s. Los sanitizantes deben tener propiedades germicidas o antimicrobianas, son utilizados en alimentos y no son capaces de destruir esporas o virus (NMX-BB-040-SCFI-1999, 1999).

## Capítulo 2. Antecedentes

La prolongación del tiempo de vida de anaquel de la fresa fresca es un área de oportunidad económica para la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías. Mediante la vinculación entre empresas privadas e Instituciones de Educación Superior se genera el esfuerzo por desarrollar sanitizantes a base de extractos vegetales comerciales para su uso en fresa. Dos formulaciones sanitizantes denominadas Formulación 1 “F1” y Formulación 2 “F2” han demostrado un efecto sanitizante *in vitro* con bacterias Gram-positiva (*S. aureus*), Gram-negativa (*E. coli*) y un hongo levaduriforme (*C. albicans*) con resultados favorables al eliminar el 99.999 % de la carga microbiana e *in situ* ensayadas en fresa fresca (*Fragaria x ananassa*, Duch cv Cristal) contra el patógeno *B. cinerea* a una escala que va desde los 200  $\mu$ L a los 1 000 mL las cuales inhiben el crecimiento del hongo en la fruta (Romero *et al.*, 2017); por ello podemos inferir que F1 y F2 son susceptibles al aumento de escala.

### 2.1. Justificación

Dos formulaciones sanitizantes para fresa se desarrollaron a nivel laboratorio y se escalaron a etapa banco con resultados favorables, por lo que es de interés continuar con el proceso de investigación y desarrollo a nivel de escala piloto de los sanitizantes para la conservación de la fresa.

### 2.2. Hipótesis

Al escalar un tanque agitado que replique dos formulaciones sanitizantes, éstas mantendrán constantes sus propiedades fisicoquímicas y microbiológicas.

### 2.3 Objetivo general

Escalar un tanque agitado que replique dos formulaciones sanitizantes a una escala de 10 L y está preserve sus propiedades fisicoquímicas y microbiológicas.

## 2.4 Objetivos particulares

- Caracterizar un tanque agitado en base al escrutinio del principio de semejanza y la relación potencia volumen.
- Escalar a 10 L las formulaciones sanitizantes.
- Determinar los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos (*in vitro* e *in situ*) de las formulaciones escaladas.
- Simular un sistema tanque agitado para las formulaciones sanitizantes a un volumen de 100 L.

## Capítulo 3. Metodología

### 3.1. Escalamiento de la formulación

Las formulaciones se reprodujeron en un modelo de tanque agitado denominado “Tanque M” a un volumen de 100 mL para observar factores de interés que influyen en el proceso para posteriormente obtener los criterios de semejanza.

#### **Análisis dimensional**

Los parámetros de escala que rigen el tanque agitado se obtuvieron con el Teorema  $\pi$  de Buckingham.

#### **Teorema $\pi$ de Buckingham**

Las dimensiones fundamentales y las variables físicas que intervienen en el proceso para determinar el número de parámetros adimensionales independientes se seleccionaron. La aplicación de este método se puede estudiar en Jonhstone y Thring, 1957.

#### **Ecuaciones diferenciales**

El perfil de velocidad por convección forzada del tanque agitado se obtuvo con la ecuación de Navies-Stokes.

#### **Ecuación de Navier-Stokes**

La ecuación de Navier-Stokes en coordenadas cilíndricas se integró parcialmente con el uso de suposiciones y límites de frontera para bajar el grado de complejidad y facilitar su integración.

#### **Principio de semejanza**

Los objetos materiales y los sistemas físicos entre modelo y prototipo se caracterizaron por tres tipos de semejanza; geométrica, dinámica y térmica. Se partió un modelo “M” con un volumen de 0.1 L y dos prototipos: “P1” y “P2” con un volumen de 1 y 10 L respectivamente.

### **Semejanza geométrica.**

Una semejanza geométrica distorsionada se mantuvo, donde las coordenadas correspondientes entre el modelo y prototipo fueron diferentes, para ésta semejanza se utilizaron relaciones de escala en lugar de factores de escala.

### **Semejanza dinámica**

La relación potencia volumen se mantuvo constante para obtener la velocidad del impulsor y así mantener semejanza dinámica entre modelo y prototipo

### **Semejanza térmica**

Las razones de cambio correspondientes se mantuvieron con los flujos de calor para mantener una relación constante entre sí.

## **3.2. Análisis fisicoquímicos**

Análisis fisicoquímicos se hicieron para comprobar que las propiedades reológicas generadas por la cocción del almidón en las formulaciones permanecieran constantes entre una escala y otra.

### **3.2.1. Densidad.**

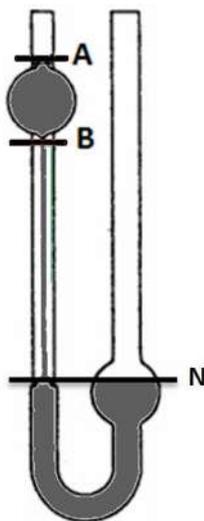
La densidad de las formulaciones se determinó por el método del picnómetro para líquidos de baja viscosidad: El picnómetro (Figura 8) limpio y vacío se pesó y se llenó con agua tridestilada (líquido de referencia) a  $25 \pm 1$  °C hasta formar un menisco convexo al final del cuello, se colocó el capilar justo encima del menisco y dejó caer, se secó toda la superficie del picnómetro y se procedió a pesarlo. El mismo procedimiento se llevó a cabo con las formulaciones.



**Figura 8.** Picnómetro para líquidos de baja viscosidad.

### 3.2.2. Viscosidad.

La viscosidad de las formulaciones se determinó por el método del viscosímetro de Ostwald para líquidos de baja viscosidad: El viscosímetro de Ostwald (Figura 9) se sujetó a un soporte universal, se vertió agua tridestilada (líquido de referencia) a  $25 \pm 1$  °C al viscosímetro hasta obtener en el bulbo inferior un nivel N a la altura del inicio del capilar, con ayuda de una jeringa se succionó el agua hasta la marca A y se cuantificó el tiempo que tarda el agua en desplazarse desde la marca A hasta la marca B. El mismo procedimiento se repitió con las formulaciones.



**Figura 9.** Viscosímetro de Ostwald. Límite superior (A), límite inferior (B) y nivel de llenado (N).

### 3.3. Análisis microbiológicos

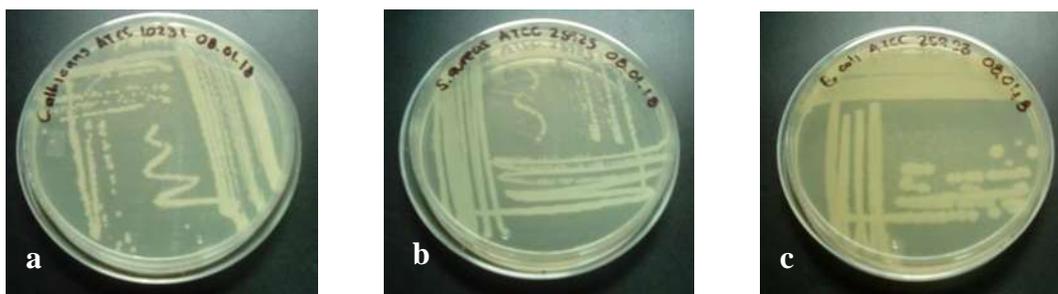
Análisis microbiológicos se hicieron *in vitro* e *in situ* para comprobar que las propiedades sanitizantes de las formulaciones no sean afectadas en el cambio de escala.

#### 3.3.1. Ensayos *in vitro*.

Las formulaciones sanitizantes reproducidas en los diferentes tanques agitados se ensayaron *in vitro* por el método de microdilución en caldo. Un laboratorio certificado en la norma NMX-BB-040-SCFI-1999 analizó a la par dichas formulaciones.

#### Material biológico

Las cepas ensayadas: *Candida albicans* ATCC 10231, *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 y *Escherichia coli* ATCC 25925 como se muestran en la Figura 10 fueron proporcionadas por el Laboratorio de Fisiología Celular del Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.



**Figura 10.** Cultivos en placa de las cepas ensayadas. a) *C. albicans* ATCC 10231, b) *S. aureus* ATCC 25923 y c) *E. coli* ATCC 25925.

#### Actividad antimicrobiana

La actividad antimicrobiana de las formulaciones se determinó por el método de microdilución en caldo. La concentración del material biológico se ajustó a una densidad óptica de 0.5 en la escala de McFarland. Las proporciones que se utilizaron para los tratamientos se muestran en la Tabla 3, se colocaron 10  $\mu\text{L}$  de las diluciones sobre cajas Petri con agar Mueller Hinton (MH) y se realizó un barrido con una varilla de vidrio. Las cajas se incubaron a 37 °C por un periodo de 24 h, pasado este tiempo se cuantificaron las unidades formadoras de colonias (UFC) con un contador de colonias.

**Tabla 3.** Proporciones de las microdiluciones para los tratamientos *in vitro*.

Tratamiento Control Positivo		Tratamiento Control Negativo	
Componente	Volumen ( $\mu\text{L}$ )	Componente	Volumen ( $\mu\text{L}$ )
Antibiótico (Ab)	20	Antibiótico (Ab)	0
Disolución con inóculo (I)	20	Disolución con inóculo (I)	20
Caldo MH	60	Caldo MH	80
Volumen total	100	Volumen total	100
Tratamiento con Inóculo		Tratamiento sin inóculo	
Componente	Volumen ( $\mu\text{L}$ )	Componente	Volumen ( $\mu\text{L}$ )
Formulación (FE)	20	Formulación (FE)	20
Disolución con inóculo (I)	20	Disolución con inóculo (I)	0
Caldo MH	60	Caldo MH	60
Volumen total	100	Volumen total	100

### 3.3.2. Ensayos *in situ*.

Las formulaciones sanitizantes se evaluaron en fresa que cumplieran los requisitos de calidad según la NMX-FF-062-SCFI-2002. Los daños de los frutos se determinaron por el grado de madurez y daño en los mismos.

#### Material biológico

El material biológico que se utilizó fue el hongo *Botrytis cinerea* pps (Figura 11) proporcionado por el Laboratorio de Fisiología Celular del Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.



**Figura 11.** Esporas de *B. cinerea* pps por microscopía óptica a 10x.

### Tratamientos en fresa

Una muestra representativa de 252 frutos que fueron sometidos a tratamientos control, preventivos y curativos como se muestra en la Tabla 4. Cada tratamiento se ensayó por duplicado en cajas con 6 fresas, almacenados a 4 °C, 8 °C y temperatura ambiente, respectivamente.

### Tratamientos control

Tres tratamientos control se llevaron a cabo, para el primer tratamiento las fresas seleccionadas se colocaron en cajas de plástico, para el segundo tratamiento control se colocó agua tridestilada estéril en un vaso de precipitados, se sumergieron las fresas por un minuto y se dejaron secar y se colocaron en cajas de plástico, el tercer tratamiento control una suspensión de esporas ( $1 \times 10^4$  esporas/mililitro) de *B. cinerea* spp se atomizó a las fresas seleccionadas y se dejaron secar para posteriormente ser colocadas en cajas de plástico.

### Tratamientos preventivos

Las fresas seleccionadas se recubrieron por inmersión en las formulaciones sanitizantes se dejaron secar y se colocaron en cajas de plástico.

### Tratamientos curativos

Las fresas recubiertas con las formulaciones sanitizantes se dejaron secar y se sumergieron en una suspensión de esporas ( $1 \times 10^4$  esporas/mililitro) de *B. cinerea* spp, se dejaron secar una vez más y se colocaron en cajas de plástico.

**Tabla 4.** Tratamientos control, preventivos y curativos para el ensayo *in situ*.

Tratamientos	Componentes
Control	
1	Fresa
2	Fresa + Agua
3	Fresa + Inóculo
Preventivos	
1	Fresa + Formulación 1
2	Fresa + Formulación 2
Curativos	

1	Fresa + Formulación 1 + Inóculo
2	Fresa + Formulación 2 + Inóculo

---

\*Todos los tratamientos se dejaron secar a temperatura ambiente (sin flujo de aire) durante 20 min y se almacenaron a las tres diferentes temperaturas (a 4 °C, 8 °C y temperatura ambiente).

### **Clasificación de los daños**

La NMX-FF-062-SCFI-2002 establece que el daño “es cualquier deterioro que afecta el tejido interno o externo de la fresa”.

#### **Daño menor**

“Es aquél que disminuye muy ligeramente la apariencia física del fruto y no afecta en forma considerable el tejido interno (mesocarpio) de la fresa, pero sí afecta levemente el epicarpio. Puede consistir en rozaduras, raspaduras, quemaduras de sol y otros defectos que sean superficiales y de escasa extensión”.

#### **Daño mayor**

“Es aquél que sin ser crítico, la fresa presenta lesiones fuertes en el epicarpio y leves en el mesocarpio (pulpa). Puede presentarse como evidencia de plagas o enfermedades, heridas cicatrizadas o magulladuras, estos defectos disminuyen notoriamente la apariencia del fruto, la calidad de mercado y la calidad de consumo”.

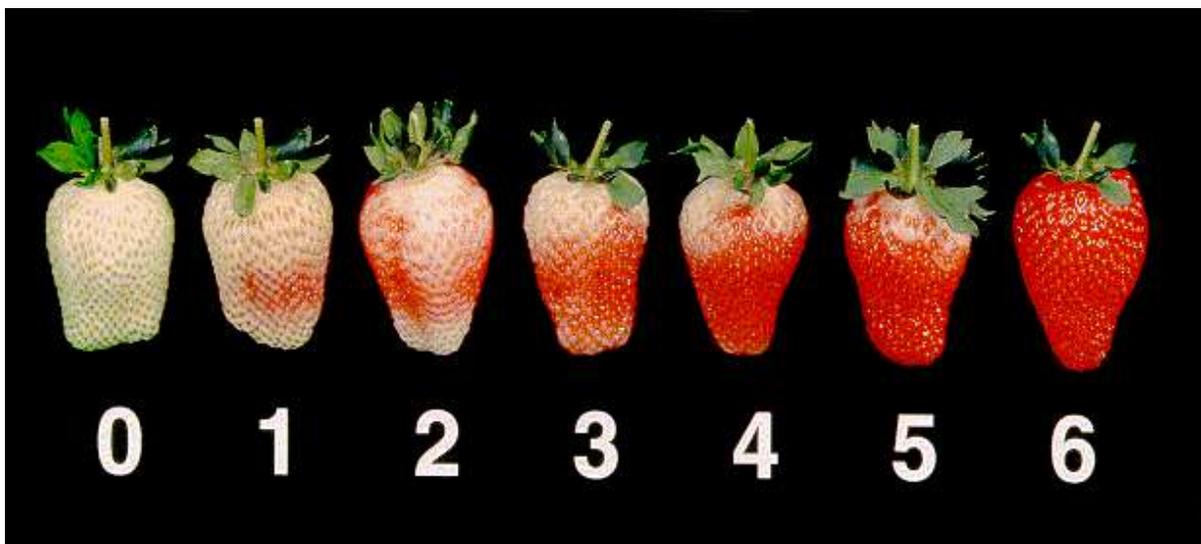
#### **Daño crítico**

“Es aquél que afecta una gran área del mesocarpio (pulpa) de la fresa y ocasiona el rechazo del fruto por el consumidor. Estos defectos consisten en estados avanzados de ataque de plagas o enfermedades, grietas, heridas no cicatrizadas y otros que afectan considerablemente la pulpa del fruto”.

#### **Color**

El color es un indicador primario de madurez (Figura 12) y es el resultado del tipo y la cantidad de antocianinas presentes en el fruto. Los cambios en el color están relacionados con el grado de “frescura” o el deterioro del producto. El color puede medirse a través de métodos

visuales (colorimetría) o mecánicos (espectrofotometría). Para este ensayo se utilizó un colorímetro (colorímetro modelo TES-35A, Linshang) para determinar el deterioro.



**Figura 12.** Color de los estados de maduración de la fresa. 0) Fruto de color blanco verdoso bien desarrollado, 1) Fruto de color blanco verdoso, con algunas áreas de color rosa en la zona apical, 2) Fruto de color blanco verdoso, con color rojo intenso en la zona apical, 3) Fruto de color rojo puro que cubre hasta la zona media del fruto y la zona de cáliz presenta visos rosados, 4) Fruto de color rojo intenso hacia el cáliz, 5) Fruto color rojo intenso que aumenta y cubre la zona del cáliz y 6) Fruto color rojo intenso que cubre todo el fruto.

### 3.4. Simulación

El programa VisiMix Turbulent SV<sup>®</sup> se usó para simular un tanque agitado denominado P3 que lleve a cabo la formulación a una capacidad de 100 L.

### 3.5. Análisis estadístico

Los datos se procesaron estadísticamente con un ANOVA con el programa Statistica 7.0 y se expresaron como la media  $\pm$  error estándar, se aplicó una prueba de comparación de medias Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

## Capítulo 4. Resultados

### Teorema $\pi$ de Buckingham

“Existe un número fijo de parámetros adimensionales independientes para un problema dado y es igual a la diferencia entre el número total de variables menos el número de dimensiones fundamentales” (Buckingham, 1914). Expresado en la Ecuación 1.

$$\Pi = V - F \quad (1)$$

Donde:  $\Pi$  = número de parámetros adimensionales independientes

$V$  = número total de variables físicas

$F$  = número total de dimensiones fundamentales

Función:  $f(D, \rho, N, \mu, g, P, U, W, E) = 0$

La Tabla 5 muestra las variables físicas que influyen en un tanque agitado

**Tabla 5.** Variables físicas en sus dimensiones fundamentales.

Variables físicas	Abreviatura	Dimensiones
Diámetro del impulsor	D	L
Densidad	$\rho$	$ML^{-3}$
Velocidad del impulsor	N	$T^{-1}$
Viscosidad	$\mu$	$ML^{-1}T^{-1}$
Gravedad	g	$LT^{-2}$
Potencia de mezclado del impulsor	P	$ML^2T^{-3}$
Diámetro del tanque	U	L
Ancho del impulsor	W	L
Largo del impulsor	E	L

$$\sum_{i=1}^V = 9 \quad (2)$$

Dimensiones fundamentales:

L = Longitud

T = Tiempo

M = Masa

$$\sum_{i=1}^F = 3 \quad (3)$$

Sustituyendo Ec. (2) y (3) en Ec. (1)

$$\Pi = 9 - 3 = 6$$

Referencias: D, N,  $\rho$

$$\begin{matrix} L \\ T \\ M \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -3 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = -1$$

La Tabla 6 muestra los posibles acomodos de las variables físicas, donde D, N y  $\rho$  son consideradas como referencias, para obtener los seis parámetros adimensionales.

**Tabla 6.** Acomodo de los parámetros adimensionales

Parámetros adimensionales	
$\Pi_1 = D^{a_1}, N^{b_1}, \rho^{c_1}, \mu$	$\Pi_4 = D^{a_4}, N^{b_4}, \rho^{c_4}, U$
$\Pi_2 = D^{a_2}, N^{b_2}, \rho^{c_2}, P$	$\Pi_5 = D^{a_5}, N^{b_5}, \rho^{c_5}, W$
$\Pi_3 = D^{a_3}, N^{b_3}, \rho^{c_3}, g$	$\Pi_6 = D^{a_6}, N^{b_6}, \rho^{c_6}, E$

Para  $\Pi_1$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -3 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$a_1 = -2 \quad b_1 = -1 \quad c_1 = -1$$

$$\Pi_1 = D^{-2}, N^{-1}, \rho^{-1}, \mu$$

$$\Pi_1 = \frac{\mu}{D^2 \rho N} = \frac{D^2 \rho N}{\mu} = N_{Re} \quad (4)$$

Para  $\Pi_2$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -3 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ -3 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = -5 \quad b_2 = -3 \quad c_2 = -1$$

$$\Pi_2 = D^{-5}, N^{-3}, \rho^{-1}, P$$

$$\Pi_2 = \frac{P}{D^5 N^3 \rho} = N_P \quad (5)$$

Para  $\Pi_3$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -3 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_3 \\ b_3 \\ c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$a_3 = -1 \quad b_3 = -2 \quad c_3 = -0$$

$$\Pi_3 = D^{-1}, N^{-2}, \rho^0, g$$

$$\Pi_3 = \frac{g}{DN^2} = \frac{DN^2}{g} = N_{Fr} \quad (6)$$

Para  $\Pi_4$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -3 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_4 \\ b_4 \\ c_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$a_4 = -1 \quad b_4 = 0 \quad c_4 = 0$$

$$\Pi_4 = D^{-1}, N^0, \rho^0, U$$

$$\Pi_4 = \frac{U}{D} = \frac{D}{U} \quad (7)$$

Para  $\Pi_5$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -3 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_5 \\ b_5 \\ c_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$a_5 = -1 \quad b_5 = 0 \quad c_5 = 0$$

$$\Pi_5 = D^{-1}, N^0, \rho^0, W$$

$$\Pi_5 = \frac{W}{D} \quad (8)$$

Para  $\Pi_6$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -3 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_6 \\ b_6 \\ c_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$a_6 = -1 \quad b_6 = 0 \quad c_6 = 0$$

$$\Pi_6 = D^{-1}, N^0, \rho^0, E$$

$$\Pi_6 = \frac{E}{D} \quad (9)$$

### Ecuación de Navier-Stokes

Ecuación de Navier-Stokes en coordenadas cilíndricas:

-Componente r

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial U_r}{\partial t} + U_r \frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{U_\theta}{r} \frac{\partial U_r}{\partial \theta} - \frac{U_\theta^2}{r} + U_z \frac{\partial U_r}{\partial z} \right) \\ = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r U_r) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 U_r}{\partial z^2} \right] + \rho g_r \quad (10) \end{aligned}$$

-Componente  $\theta$

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial U_\theta}{\partial t} + U_r \frac{\partial U_\theta}{\partial r} + \frac{U_\theta}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + \frac{U_r U_\theta}{r} + U_z \frac{\partial U_\theta}{\partial z} \right) \\ = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r U_\theta) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial U_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 U_\theta}{\partial z^2} \right] + \rho g_\theta \quad (11) \end{aligned}$$

-Componente z

$$\rho \left( \frac{\partial U_z}{\partial t} + U_r \frac{\partial U_z}{\partial r} + \frac{U_\theta}{r} \frac{\partial U_z}{\partial \theta} + U_z \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \quad (12)$$

### Perfil de velocidad

Suposiciones:

-No hay movimiento en r y z  $\therefore$  se eliminan la ec. 10 y 12

-Estado estable  $\therefore \frac{\partial U_\theta}{\partial t} = 0$

-Las velocidades que existen son:

$$\begin{array}{ll} U_z = 0 & \frac{\partial U_\theta}{\partial z} = 0 \\ U_r = 0 & \frac{\partial U_\theta}{\partial r} \neq 0 \\ U_\theta \neq 0 & \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} = 0 \end{array}$$

-Efecto de la fuerza centrífuga

$$-\frac{U_\theta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial P}{\partial r} \right)$$

-Efecto de la presión hidrostática

$$0 = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right) + g_z$$

-Velocidad angular =  $\Omega_\theta$

-Flujo laminar

Entonces la Ec. (11) se reduce a:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r U_\theta) \right) = 0 \quad (13)$$

Resolviendo la Ec. (13)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r U_\theta) = C_1 \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} (r U_\theta) = C_1 r \quad (15)$$

$$\partial(rU_\theta) = C_1 r dr \quad (16)$$

$$rU_\theta = C_1 \frac{r^2}{2} + C_2 \quad (17)$$

$$U_\theta = C_1 \frac{r}{2} + \frac{C_2}{r} \quad (18)$$

Condiciones de frontera:

$$r = kR \quad U_\theta = 0 \quad (19)$$

$$r = R \quad U_\theta = \Omega_\theta R \quad (20)$$

Sustituyendo la Ecuación (19) en la (18) por lo tanto

$$0 = \frac{C_1 kR}{2} + \frac{C_2}{2} \quad (21)$$

Multiplicando la Ecuación (21) por  $kR$  y despejando  $C_2$

$$C_2 = - \frac{C_1 k^2 R^2}{2} \quad (22)$$

Sustituyendo Ecuación (20) en la (18) entonces

$$\Omega_\theta R = \frac{C_1 R}{2} + \frac{C_2}{R} \quad (23)$$

Sustituyendo Ecuación (22) en la (23) tenemos que

$$\Omega_\theta R = \frac{C_1 R}{2} - \frac{C_1 k^2 R}{2} \quad (24)$$

$$\Omega_\theta R = C_1 \left( \frac{R}{2} - \frac{k^2 R}{2} \right) \quad (25)$$

$$\Omega_\theta = C_1 \left( \frac{1}{2} - \frac{k^2}{2} \right) \quad (26)$$

Despejando  $C_1$  de la Ecuación (26)

$$C_1 = \frac{\Omega_\theta}{\left(\frac{1}{2} - \frac{k^2}{2}\right)} \quad (27)$$

$$C_1 = \frac{\Omega_\theta}{\left(\frac{1 - k^2}{2}\right)} \quad (28)$$

$$C_1 = \frac{2\Omega_\theta}{1 - k^2} \quad (29)$$

Sustituyendo Ecuación (29) en la (22) obtenemos

$$C_2 = - \frac{\left(\frac{2\Omega_\theta}{1 - k^2}\right) k^2 R^2}{2} \quad (30)$$

$$C_2 = \frac{\Omega_\theta k^2 R^2}{1 - k^2} \quad (31)$$

Sustituyendo Ecuación (29) y (31) en la (18) por lo que

$$U_\theta = \frac{\Omega_\theta}{1 - k^2} r + \frac{\Omega_\theta k^2 R^2}{1 - k^2} \frac{1}{r} \quad (32)$$

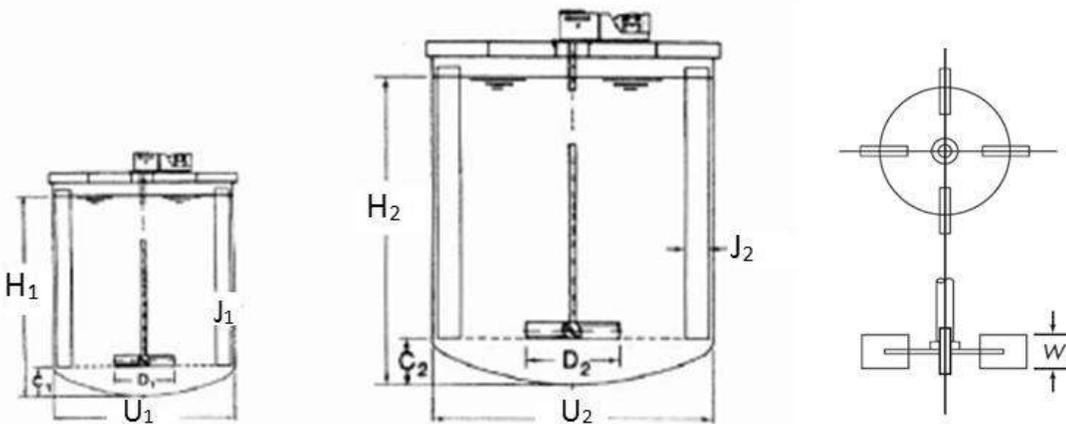
$$U_\theta = \frac{\Omega_\theta}{1 - k^2} \left( r + \frac{k^2 R^2}{r} \right) \quad (33)$$

### Principio de semejanza

Se caracterizó por tres cualidades: tamaño, forma y composición, las cuales son variables independientes.

### Semejanza geométrica

La semejanza geométrica utilizada para la representación del sistema de agitación se muestra en la Figura 14 la cual representa la similitud de las dimensiones físicas entre modelo y prototipo del tanque agitado, ver Tabla 7.



**Figura 13.** Dimensiones de un tanque a escala propuesta para el prototipo del tanque. diámetro de impulsor (D), diámetro de tanque (U), altura de trabajo (H), ancho del impulsor (W), ancho del deflector (J) y altura que media entre el fondo del tanque y el impulsor (C).

#### Factores de escala:

$$\frac{D_1}{U_1} = \frac{D_2}{U_2} = \frac{1}{3}, \quad \frac{W_1}{D_1} = \frac{W_2}{D_2} = \frac{1}{5}, \quad \frac{E_1}{D_1} = \frac{E_2}{D_2} = \frac{1}{4}$$

$$\frac{H_1}{U_1} = \frac{H_2}{U_2} = 1, \quad \frac{C_1}{U_1} = \frac{C_2}{U_2} = \frac{1}{3}, \quad \frac{J_1}{U_1} = \frac{J_2}{U_2} = \frac{1}{12}$$

(McCabe, 2007)

**Tabla 7.** Dimensiones de los tanques propuestos en el proceso de escalamiento.

Dimensiones del tanque	Tanque M (cm)	Tanque P1 (cm)	Tanque P2 (cm)
U	6.37	10.4	21
D	2.04	3.48	7
H	3	7.37	19.1
W	0.58	0.85	1.6

**Semejanza dinámica**

Retomando la Ecuación (4)

$$N_{Re} = \frac{N\rho D^2}{\mu}$$

Datos:

Propiedades fisicoquímicas

$$\rho_{H_2O} = 0.9969 \frac{g}{cm^3}$$

$$\mu_{H_2O} = 9.1534 \times 10^{-3} \frac{g}{cm \ s}$$

Dimensiones del tanque M

$$V = 100 \text{ cm}^3$$

$$U_1 = 6.37 \text{ cm}$$

$$D_1 = 2.04 \text{ cm}$$

$$H_1 = 3.00 \text{ cm}$$

$$W_1 = 0.58 \text{ cm}$$

Potencia

$$N = 8. \bar{3} s^{-1}$$

$$N_p = 5.8$$

Sustituyendo valores en Ecuación (4) tenemos que:

$$N_{Re} = \frac{(8. \bar{3} s^{-1}) \left(0.9969 \frac{g}{cm^3}\right) (2.04 \text{ cm})^2}{9.1534 \times 10^{-3} \frac{g}{cm \ s}}$$

$$= 3 \ 776. \ 9958 \rightarrow \text{Transitor}$$

Retomando la Ecuación (5)

$$N_p = \frac{P}{N^3 D^5 \rho}$$

Sustituyendo valores en Ecuación (5) y despejando P tenemos que:

$$\begin{aligned} P &= 5.8(8.3s^{-1})^3(2.04\text{ cm})^5 \left(0.9969 \frac{g}{cm^3}\right) \\ &= 116\,805.8795 \frac{g\text{ cm}^2}{s^3} \end{aligned}$$

Dividiendo el valor de P con el volumen del tanque M tenemos que:

$$P/V = \frac{116\,805.8795 \frac{g\text{ cm}^2}{s^3}}{100\text{ cm}^3} = 1\,168.0588 \frac{g}{cm\text{ s}^3} \quad (34)$$

$$N_{Fr} = nt_T \left(\frac{D}{U}\right)^2 \left(\frac{U}{H}\right)^{1/2} \left(\frac{8}{N^2 D}\right)^{1/6} \quad (35)$$

$$nt_T = 16.9 \left(\frac{U}{D}\right)^{1.67} \left(\frac{H}{U}\right)^{1/2} \quad (36)$$

Sustituyendo valores en la Ecuación (36)

$$nt_T = 16.9 \left(\frac{6.37\text{ cm}}{2.04\text{ cm}}\right)^{1.67} \left(\frac{3\text{ cm}}{6.37\text{ cm}}\right)^{1/2} = 77.0120$$

Sustituyendo valores en Ecuación (35) tenemos que

$$N_{Fr} = 77.0120 \left(\frac{2.04\text{ cm}}{6.37\text{ cm}}\right)^2 \left(\frac{6.37}{3\text{ cm}}\right)^{1/2} \left(\frac{8}{8.3s^{-1}^2 2.04\text{ cm}}\right)^{1/6} = 7.19$$

Retomando Ecuación (7) y (8)

$$\frac{D}{U} = \frac{2.04\text{ cm}}{6.37\text{ cm}} = \mathbf{0.3203}$$

$$\frac{W}{D} = \frac{0.58\text{ cm}}{2.04\text{ cm}} = \mathbf{0.2943}$$

El mismo procedimiento se repite con los tanques P1 y P2 (ver Tabla 8).

**Nota:** Las revoluciones por minuto de los tanques P1 y P2 se obtienen por medio de la relación P/V con un número de potencia constante e igual a 5.8 (McCabe, 2007).

$$\begin{aligned} \text{Dimensiones del tanque M} \quad & V = 1\,000 \text{ cm}^3 \\ & U_2 = 10.4 \text{ cm} \\ & D_2 = 3.48 \text{ cm} \\ & H_2 = 7.37 \text{ cm} \\ & W_2 = 0.85 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$P/V = 1\,1168.0588 \frac{g}{\text{cm s}^3}$$

Despejando P de la Ecuación (35) y sustituimos el valor del volumen del tanque P1 entonces

$$P = \left(1\,1168.0588 \frac{g}{\text{cm s}^3}\right) (1\,000 \text{ cm}^3) = 1\,168\,058.8 \frac{g \text{ cm}^2}{\text{s}^3}$$

Sustituyendo nuevos valores en Ecuación (5)

$$5.8 = \frac{1\,168\,058.8 \frac{g \text{ cm}^2}{\text{s}^3}}{N^3 (3.48 \text{ cm})^5 \left(0.9969 \frac{g}{\text{cm}^3}\right)}$$

Despejando N tenemos que

$$N = 7.3420 \text{ s}^{-1} = 440.52 \text{ RPM}$$

**Tabla 8.** Resultados de las relaciones de diseño de los diferentes tanques agitados.

Relaciones de Diseño	Tanque "M" (100 cm <sup>3</sup> )	Tanque "P1" (1 000 cm <sup>3</sup> )	Tanque "P2" (10 000 cm <sup>3</sup> )
N <sub>Re</sub>	3 776	9 683	26 335
N <sub>p</sub>	5.8	5.8	5.8
N <sub>Fr</sub>	7.19	6.8789	6.6595
D/U	0.3203	0.3346	0.3333
W/D	0.2843	0.2443	0.2286

## Análisis fisicoquímicos

Los resultados de los análisis fisicoquímicos a diferentes escalas se muestran en las Tablas 9 (para densidad) y 10 (para viscosidad) los cuales fueron obtenidos con las Ecuaciones (38) y (39) respectivamente.

### Densidad

$$\rho = \frac{m_F - m_V}{V_{\text{Real}}} \quad (37)$$

Donde:

$\rho$  = Densidad

$m_v$  = Peso del picnómetro vacío

$m_F$  = Peso del picnómetro con el formulado

$V_{\text{Real}}$  = Peso del picnómetro con el líquido de referencia

**Tabla 9.** Densidad de las dos formulaciones a las diferentes escalas.

Tamaño de Escala	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	
	Formulación 1	Formulación 2
M (0.1 L)	0.998 ± 3.2760 x 10 <sup>-4</sup>	0.9975 ± 5.4981 x 10 <sup>-5</sup>
P1 (1 L)	0.9985 ± 6.1189 x 10 <sup>-4</sup>	0.9983 ± 6.6017 x 10 <sup>-4</sup>
P2 (10 L)	0.9988 ± 1.8613 x 10 <sup>-4</sup>	0.9986 ± 8.4293 x 10 <sup>-4</sup>

Los valores que se muestran son resultado de un promedio de tres muestras ± DE.

### Viscosidad

$$\mu_F = \frac{\rho_F \cdot t_F}{\rho_R \cdot t_R} (\mu_R) \quad (38)$$

Donde:

$\rho_F$  = Densidad de la formulación

$\rho_R$  = Densidad del fluido de referencia

$t_F$  = Tiempo que tarda en descender el formulado

$t_R$  = Tiempo que tarda en descender el fluido de referencia

**Tabla 10.** Viscosidad de las dos formulaciones a las diferentes escalas.

Tamaño de Escala	Viscosidad ( $1 \times 10^{-3}$ g/cm·s)	
	Formulación 1	Formulación 2
M (0.1 L)	$9.4560 \pm 6.4540 \times 10^{-2}$	$9.0491 \pm 6.5807 \times 10^{-2}$
P1 (1 L)	$8.5218 \pm 0.1622 \times 10^{-2}$	$8.4052 \pm 0.4378 \times 10^{-2}$
P2 (10 L)	$9.1413 \pm 6.6656 \times 10^{-3}$	$9.13690 \pm 3.2010 \times 10^{-2}$

Los valores que se muestran son resultado de un promedio de tres muestras  $\pm$  DE.

### Análisis microbiológicos

Los resultados de los análisis microbiológicos se desglosa a continuación.

#### Ensayos *in vitro*

Las células sobrevivientes después de 24 h de incubación de las dos formulaciones a diferentes escalas se muestran en la Tabla 11.

$$\% \text{ de reducción} = 100 - \frac{S \times 100}{C.V.} \quad (39)$$

Donde:

S = Células sobrevivientes

C.V = Cuenta viable inicial

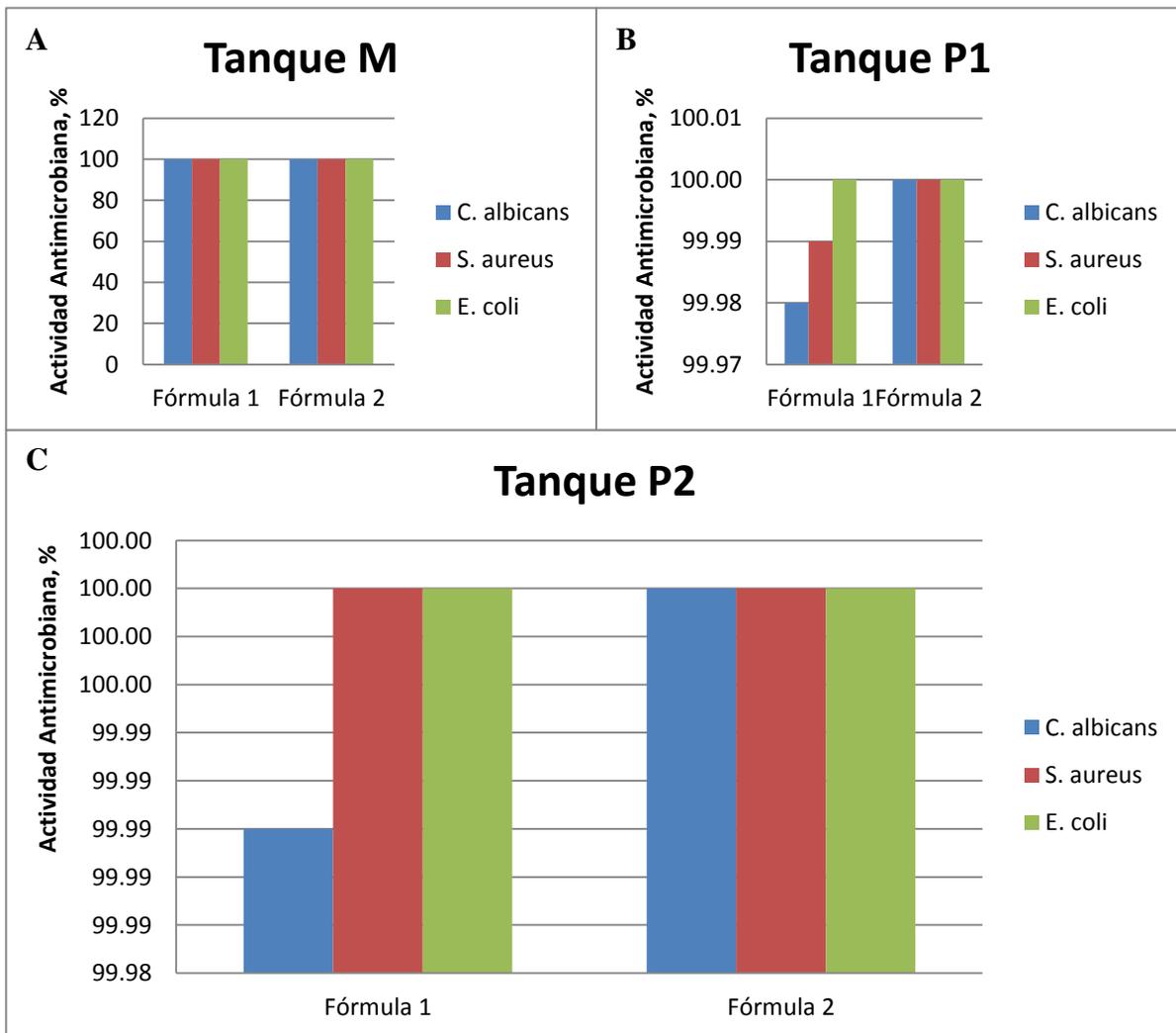
**Tabla 11.** Conteo de células sobrevivientes después de 24 h de incubación de las dos formulaciones a diferentes escalas.

Tamaño de Escala	Actividad antimicrobiana					
	<i>C. albicans</i>		<i>S. aureus</i>		<i>E. coli</i>	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2
M (0.1 L)	3	3	2	3	0	0
P1 (1 L)	28	15	36	3	0	0
P2 (10 L)	24	23	0	0	0	0

La actividad sanitizante de las dos formulaciones a diferentes escalas obtenida con la Ecuación (39) y los resultados de la Tabla 11, se muestra en la Tabla 12.

**Tabla 12.** Porcentaje de reducción de carga microbiana o Actividad sanitizante de las dos formulaciones a diferentes escalas.

Tamaño de Escala	Actividad antimicrobiana, %					
	<i>C. albicans</i>		<i>S. aureus</i>		<i>E. coli</i>	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2
M (0.1 L)	100	100	100	100	100	100
P1 (1 L)	99.89	100	99.99	100	100	100
P2 (10 L)	99.99	100	100	100	100	100



**Figura 14.** Las formulaciones a diferentes escalas mantienen sus propiedades antimicrobianas. A) 0.1 L, B) 1 L y C) 10 L.

**Ensayos *in situ***

El efecto de los tratamientos a diferentes temperaturas (Tabla 13) en el almacenamiento de la fresa se muestra en la Figura 17.



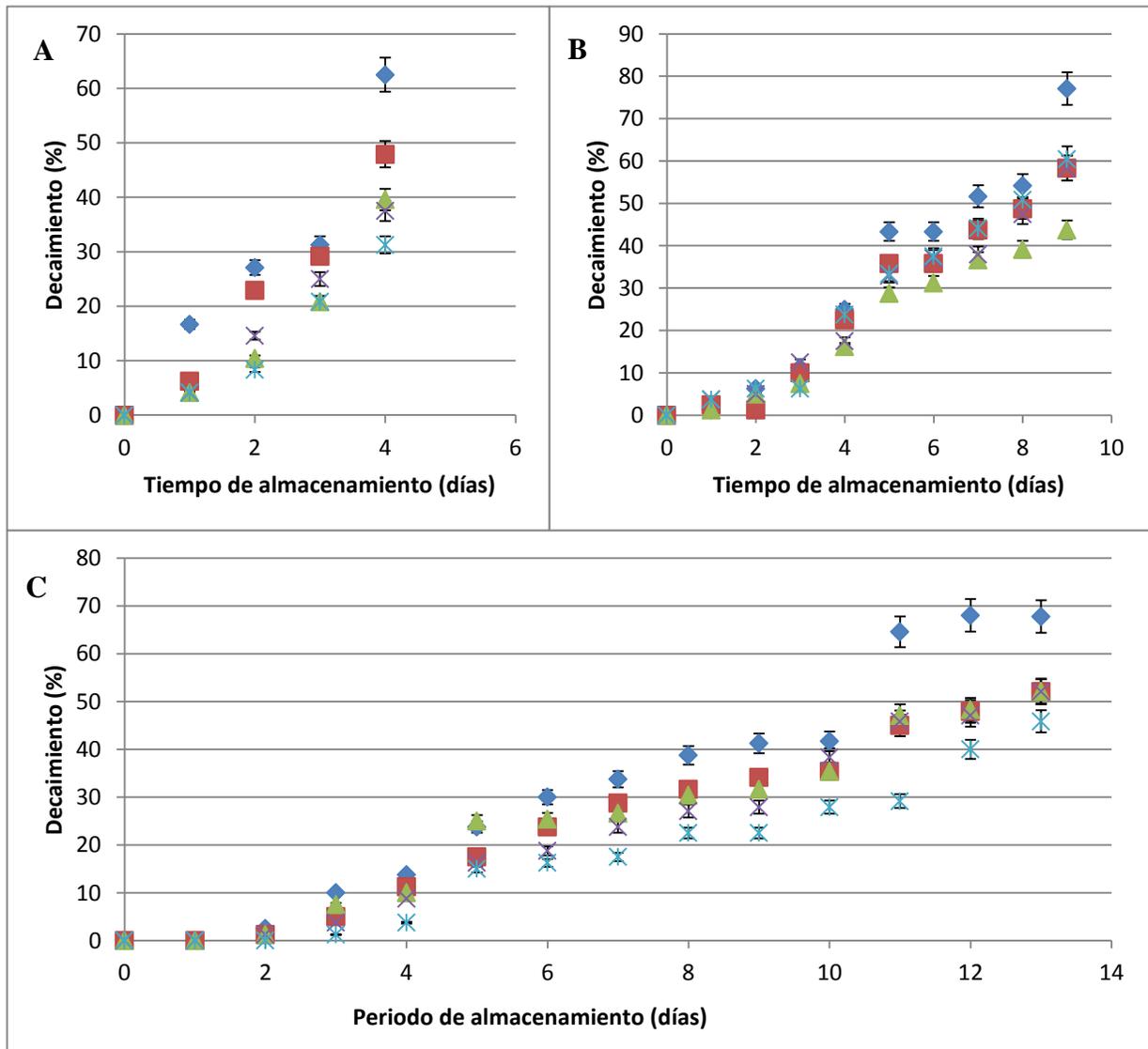
**Figura 15.** Imágenes representativas de los tratamientos. A) día 0, control lado izquierdo y curativo lado derecho, B) día 14 de almacenamiento a 4 °C control lado izquierdo y curativo lado derecho.

**Tabla 13.** Efecto de los tratamientos a diferentes temperaturas con respecto al tiempo de almacenamiento de la fresa ( $T_{\text{ambiente}}$  al día 4,  $T = 4\text{ °C}$  al día 9 y  $T = 8\text{ °C}$  al día 13)

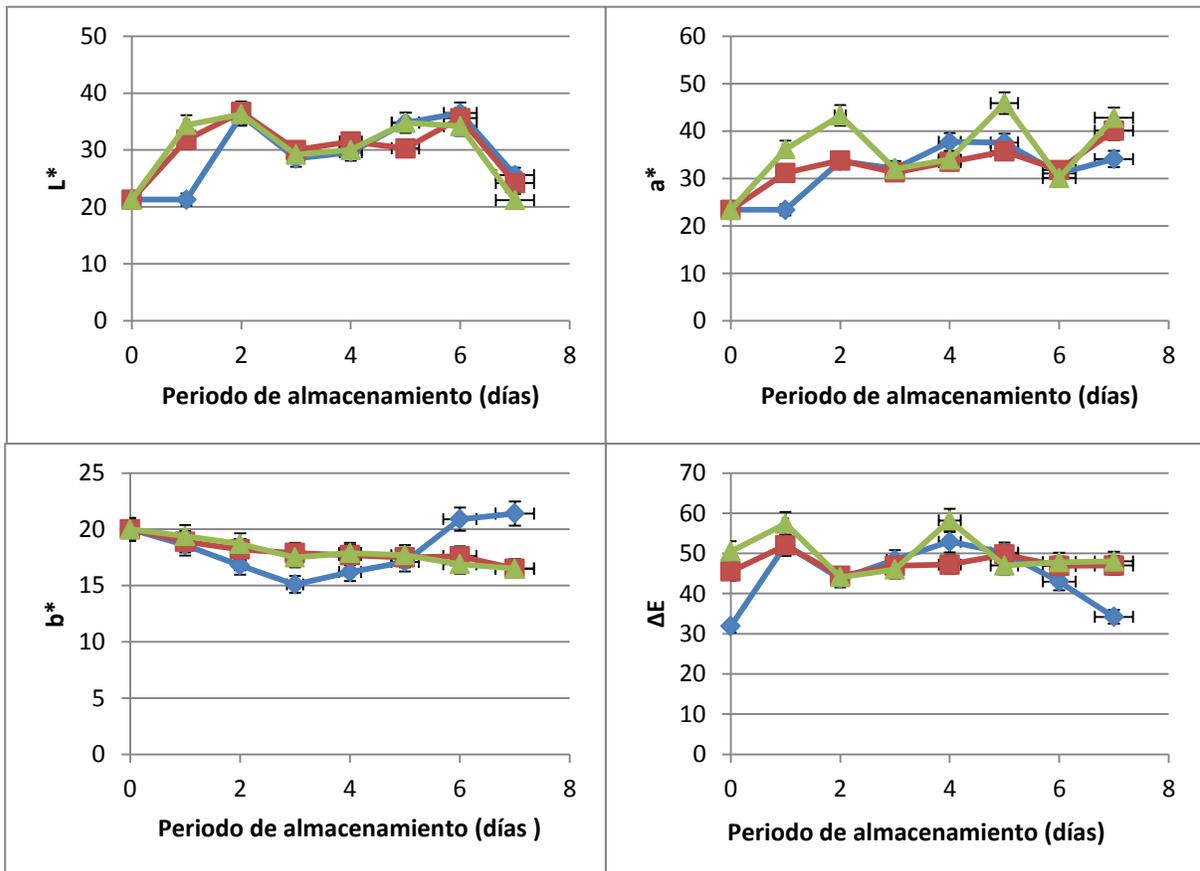
Tratamiento		Control	Preventivo 1	Preventivo 2	Curativo 1	Curativo 2
Índice de decaimiento (%)	$T_{\text{ambiente}}$	62.5±4.15 <sup>a</sup>	47.9±2.10 <sup>b</sup>	39.6±0.55 <sup>bc</sup>	37.5±0.10 <sup>bc</sup>	31.3±1.25 <sup>c</sup>
	$T = 8\text{ °C}$	77.1±1.05 <sup>a</sup>	58.3±0.75 <sup>b</sup>	43.8±1.60 <sup>b</sup>	58.3±2.10 <sup>b</sup>	60.4±0.35 <sup>ab</sup>
	$T = 4\text{ °C}$	68±1.05 <sup>a</sup>	52±0.75 <sup>b</sup>	52±1.60 <sup>b</sup>	52±2.10 <sup>b</sup>	46±0.35 <sup>b</sup>

Los resultados son promedio de dos repeticiones con una  $n = 6 \pm \text{ES}$ . Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

\*Cada temperatura de tratamiento es independiente en si misma.



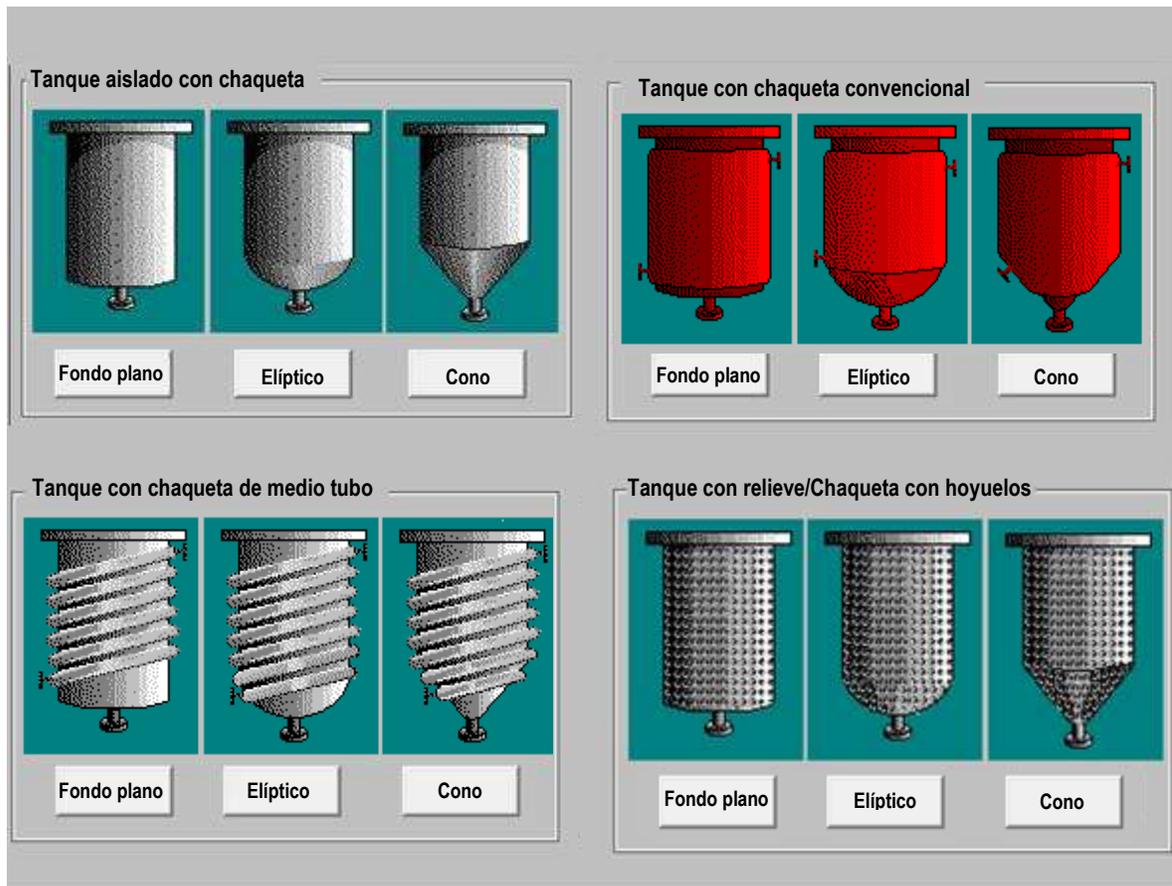
**Figura 16.** Índice de decaimiento en fresa almacenada a diferentes temperaturas A) temperatura ambiente, B) 8 °C y C) 4 °C. Control (♦), Preventivo 1 (■), Preventivo 2 (▲), Curativo 1 (×) Curativo 2 (✱). Los resultados son promedio de dos repeticiones con una  $n = 6 \pm ES$ . Tukey ( $P \leq 0.05$ ).



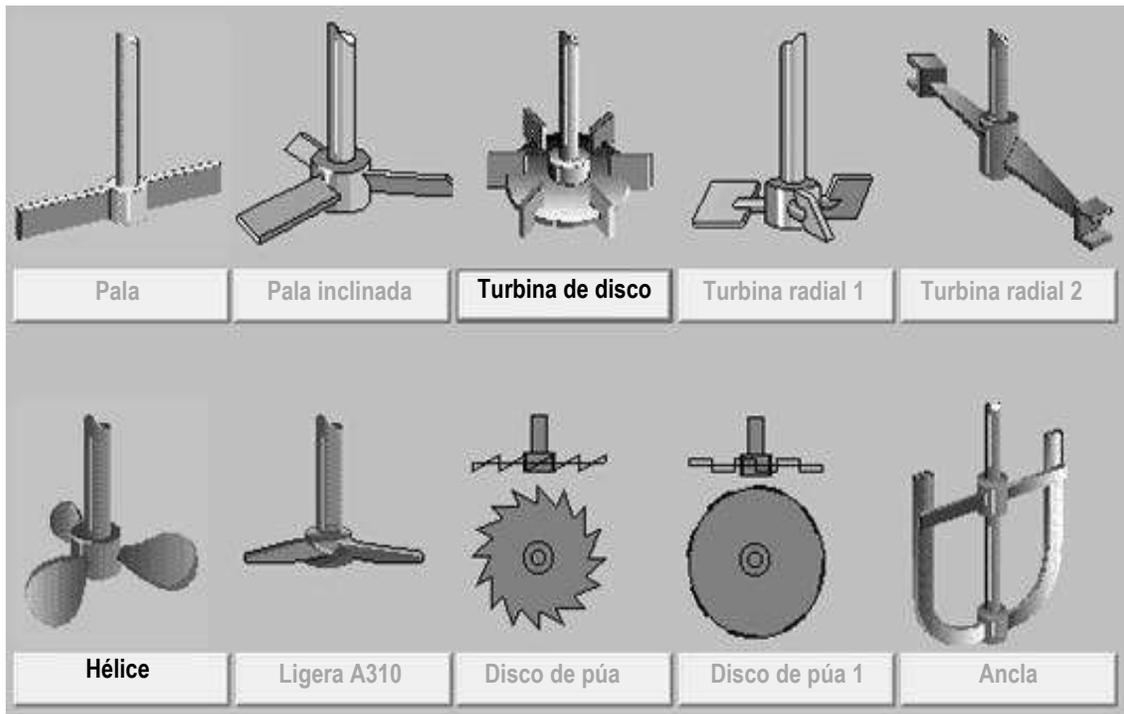
**Figura 17.** Parámetros de color durante el periodo de almacenamiento de la fresa a 4 °C Control (♦), Formulació 1 (■) y Formulació 2 (▲). Los resultados son promedio de dos repeticiones con una n = 6 ± ES (P ≤ 0.05).

## Simulación

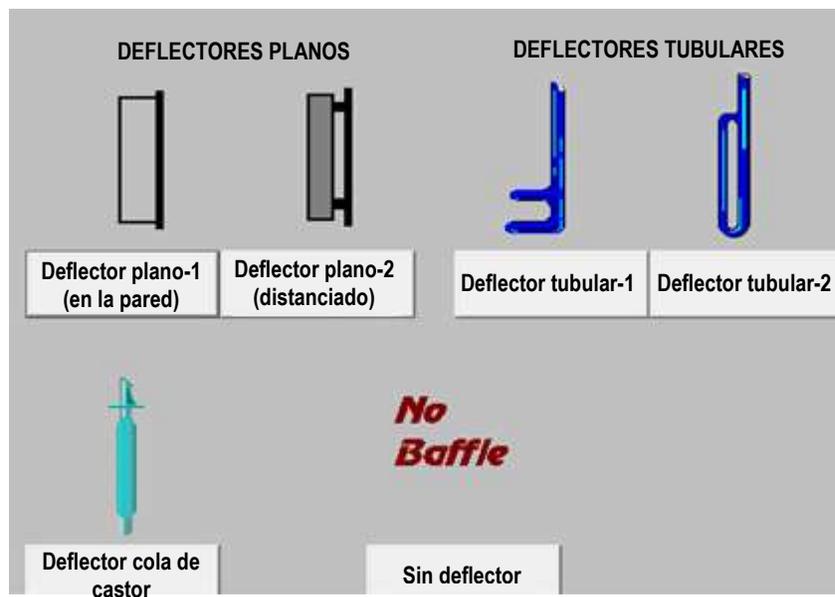
Las Figuras 19, 20 y 21 exhiben los tipos de tanques y accesorios predeterminados en la versión de prueba del programa VisiMix Turbulent SV®.



*Figura 18.* Tipos de tanques.



*Figura 19.* Tipos de impulsores.



*Figura 20.* Tipos de deflectores.

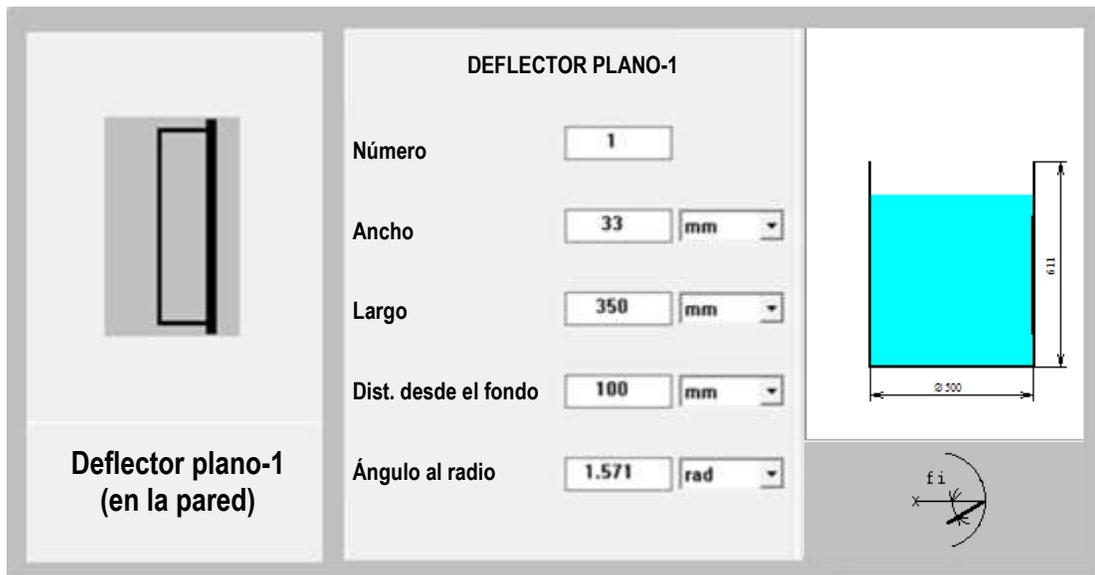
Las Figuras 22, 23 y 24 muestran el tipo de tanque, así como, los accesorios implementados en la simulación para el tanque P3 con la versión de prueba del programa VisiMix Turbulent SV<sup>®</sup>.



Figura 22. Tanque y especificaciones de diseño.

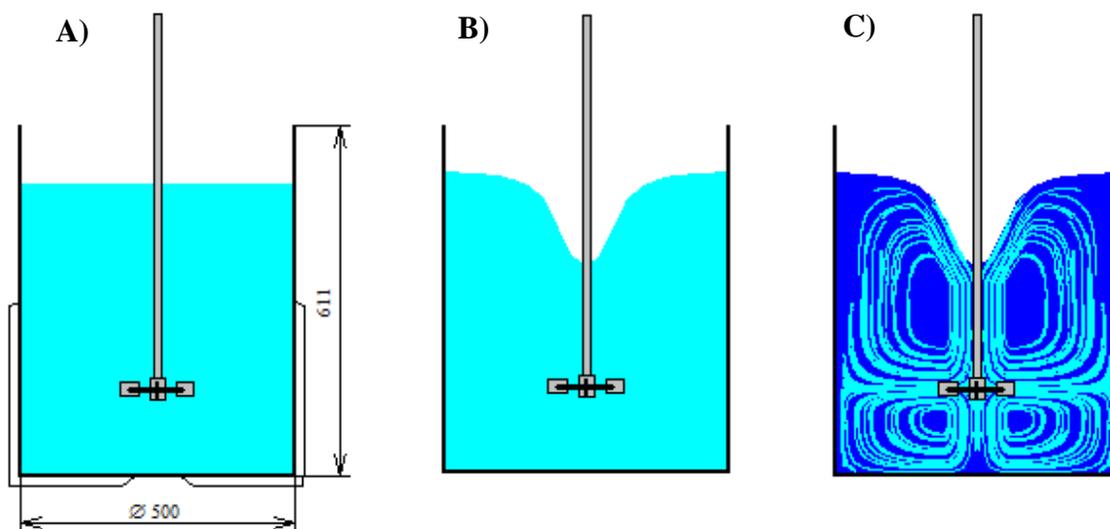


Figura 21. Impulsor y especificaciones de diseño.



**Figura 23.** Selección del deflector y especificaciones de diseño

Las imágenes representativas de las dimensiones del tanque P3, la formación de vórtice, así como, el patrón de flujo se muestran en la Figura 25.



**Figura 24.** Tanque P3 modelado en la versión de prueba del programa VisiMix Turbulent SV<sup>®</sup>. A) Dimensiones del tanque, diámetro de 50 cm y una altura del tanque de 62 cm, B) Formación de vórtice y C) Patrón de flujo.

Las características y parámetros del tanque P3 obtenidas en la versión de prueba del programa VisiMix Turbulent SV<sup>®</sup> se indican en las Tablas 14, 15 y 16. El perfil de velocidad se muestra en la Figura 26.

**Tabla 14.** Características hidrodinámicas.

Parámetro	Valor	Unidades
Potencia	4.83	W
Número de Reynolds	$1.02 \times 10^5$	
Valor promedio de la velocidad tangencial	59.8	cm/s

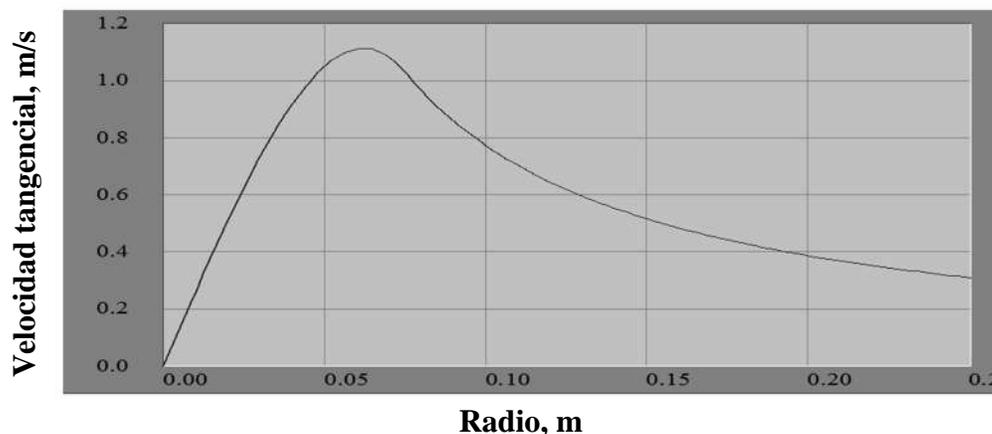
**Tabla 15.** Parámetros del vórtice.

Parámetro	Valor	Unidades
Profundidad del vórtice	17	cm
Volumen del vórtice	3 140	cm <sup>3</sup>
Área promedio de la superficie	2 160	cm <sup>2</sup>
Incremento en el nivel debido a la formación del vórtice	16	cm

**Tabla 16.** Características del flujo tangencial

Parámetro	Valor	Unidades
Valor medio de la velocidad tangencial	59.8	cm/s
Valor máximo de la velocidad tangencial	111	cm/s
Velocidad tangencial en la pared del tanque	31.5	cm/s
Velocidad en la punta del impulsor	196	cm/s

**Distribución radial de la velocidad tangencial**



*Figura 25.* Perfil de velocidad.

## Capítulo 5. Análisis de resultados

El almidón es una molécula compuesta por dos polisacáridos, la amilosa y la amilopectina en proporciones del 25 y 75 %, respectivamente (Canónico-Franco, 2003). La proporción monomérica así como el tamaño y la forma del gránulo varía dependiendo de la especie botánica (Tovar-Benítez, 2008). Factores como el calor, humedad y presión transforma el almidón en un material viscoelástico (Lai y Kokini, 1991). Los gránulos de almidón son insolubles en agua fría, pero se hinchan cuando se calientan en un medio acuoso. A éste proceso se le denomina cocción, el cual inicia con la gelatinización y concluye con la desxtrinización (Gomez y Aguilera, 1984). Inicialmente, el hinchamiento es reversible y la birrefringencia del gránulo no se pierde (Canónico-Franco, 2003). La distribución y el tamaño del gránulo en la cocción del almidón es un indicador de la uniformidad de la temperatura y la homogeneidad en la agitación. Las distribuciones del tamaño de partícula obtenidas al dispersar el almidón en agua se mostraron en la Figura 13; las partículas del almidón de papa son circulares para los tamaños pequeños y elípticas para los tamaños grandes con superficies lisas y homogéneas (Medina y Salas, 2008). Las muestras cocidas a 50 °C mostraron una distribución similar a la muestra cruda, con pequeños cambios en el tamaño del gránulo de almidón, conforme la temperatura incrementa, el gránulo de almidón aumenta su tamaño. Cuando el hinchamiento llega a ser irreversible y la estructura del gránulo se altera significativamente se le conoce como gelatinización (Lai y Kokini, 1991). Para temperaturas de cocimiento de 70 °C y mayores la distribución en el gránulo de almidón se vuelve constante, esto se debe a que la gelatinización del almidón cesa a los 67 °C.

Las condiciones necesarias para la existencia de “semejanza” entre prototipo y modelo son expresadas como igualdades entre razones de magnitudes correspondientes dentro del mismo sistema (Johnstone y Thring, 1957). Los resultados del Teorema  $\pi$  de Buckingham expresan el comportamiento del sistema físico en cuestión. Para este análisis se seleccionaron nueve variables físicas que intervienen en el proceso de agitación (densidad, viscosidad, gravedad, potencia, velocidad del impulsor, diámetro del impulsor, diámetro del tanque, ancho del impulsor y largo del impulsor) y tres dimensiones fundamentales (longitud, tiempo y masa).

Los resultados del teorema  $\pi$  de Buckingham infieren que el escalamiento del tanque agitado dependerá de los siguientes parámetros adimensionales.

$$\varphi \left( N_{Re}, N_P, N_{Fr}, \frac{D}{U}, \frac{W}{D}, \frac{E}{D} \right)$$

El principio de semejanza se caracterizó mediante tres cualidades: tamaño, forma y composición (González, 2000). Para el sistema físico en cuestión se aplicaron las semejanzas: geométrica, dinámica y térmica. La semejanza geométrica utilizada para la representación entre modelo y prototipo del sistema de agitación se mostraron en la Figura 14. Asimismo una semejanza distorcionada se empleó ya que las relaciones de escala son diferentes en algunas de las direcciones. En la Tabla 7 se presentaron las dimensiones de los tres diferentes tanques propuestos en el proceso de escalamiento de los cuales destacan como variables de interés el diámetro del tanque, el diámetro del impulsor, la altura de trabajo y el ancho del impulsor. Para la semejanza dinámica se caracterizó el movimiento del flujo dentro de los tanques agitados con el número de Reynolds para determinar el régimen que poseen el modelo y los prototipos, el régimen cambia de transitorio a turbulento a partir del prototipo “P2” lo que descarta una semejanza cinemática debido al cambio en los patrones de flujo, no obstante se mantuvo una relación P/V constante, lo que permitió obtener la velocidad del impulsor de los tres prototipos y conservar una semejanza dinámica.

Los resultados de los análisis fisicoquímicos de la densidad (Tabla 9) y la viscosidad (Tabla 10) de las formulaciones F1 y F2 en las diferentes escalas con los tanques agitados M, P1 y P2 no presentaron cambios significativos. Por lo que, las propiedades fisicoquímicas de las formulaciones se considera que permanecen constantes.

Los resultados de los análisis microbiológicos *in vitro* (Figura 15) mostraron que las formulaciones F1 y F2 en las diferentes escalas conservan sus propiedades sanitizantes eliminando el 99.99 % de la carga microbiológica. La formulación F2 presentó una mayor actividad antimicrobiana independientemente de la escala.

Los resultados de los ensayos *in situ* (Figura 17) mostraron que las formulaciones F1 y F2 además de una temperatura de almacenamiento, pueden utilizarse para retrasar el decaimiento, mantener los atributos de calidad y evitar el uso de plaguicidas como medio de conservación

al evitar el deterioro de la fresa durante su almacenamiento y por tanto prolonga el tiempo de vida de anaquel de la misma.

La seguridad microbiológica y apariencia visual se consideran los principales factores que contribuyen a la comercialización de los productos frescos, por lo que el color es una de las principales características deseables que pueden determinar la aceptación del producto por parte del consumidor (Sivarooban et al., 2008). La luminosidad ( $L^*$ ) de las fresas tratadas (Figura 18) fue significativa ( $p \leq 0.05$ ) afectada por el tiempo de almacenamiento que refleja una disminución en el valor en el período que va de 3 a 5 días. Sin embargo, los valores  $L^*$  al final del período de almacenamiento no fueron significativamente diferentes de los iniciales, lo que demuestra que no se produjeron cambios drásticos durante el almacenamiento. El valor  $a^*$  de todas las muestras de fresa aumentó con el tiempo, lo que demuestra que la latencia de tener un color rojo más saturado, esto debido a la maduración del fruto. Las mediciones de los valores  $b^*$ , que representan la cromaticidad de los colores azul y amarillo, mostraron una reducción significativa ( $p \leq 0.05$ ).

La simulación mostró que un tanque agitado de fondo plano con chaqueta convencional, con un diámetro de 50 cm y 66 cm de alto (Figura 22) con un impulsor de turbina de disco tipo “Rushton de 6 palas” con un diámetro de 15 cm, una velocidad de impulsor de 250 RPM, un motor de 10.7 W (Figura 23) y un deflector (Figura 24): éstas son las especificaciones ideales para llevar a cabo las formulaciones F1 y F2 a un volumen de 100 L. Los resultados muestran un régimen turbulento, una potencia de 4.83 W y una velocidad tangencial promedio de 5.98 cm/s (Tabla 14). La simulación con la versión de prueba del programa VisiMix Turbulent SV<sup>®</sup> demuestra la formación de un vórtice con una altura de 17 cm y un volumen de 3.14 L que desfasará el fluido e incrementará 16 cm el nivel del tanque. El perfil de velocidad tangencial muestra (Figura 26) que la velocidad máxima en el tanque será de 111 cm/s y la mínima de 31.5 cm/s en la pared del tanque; la velocidad en la punta del impulsor alcanza los 196 cm/s.

## Capítulo 6. Resumen de resultados

- El teorema  $\pi$  de Buckingham proporcionó los parámetros adimensionales de los que depende el tanque agitado a escala piloto.
- En el principio de semejanza se utilizó la geometría, la dinámica y la transferencia de calor para el escalamiento a nivel piloto de los tanques agitados.
- Los tanques agitados M, P1 y P2 mantuvieron constantes los parámetros fisicoquímicos de las formulaciones F1 y F2.
- Las formulaciones F1 y F2 replicadas en los tanques agitados M, P1 y P2 mantuvieron sus propiedades sanitizantes y los atributos de calidad de la fresa.
- La simulación con la versión de prueba del programa VisiMix Turbulent SV<sup>®</sup> caracterizó los parámetros de un tanque agitado a un volumen de 100 L.

## **Capítulo 7. Conclusiones**

Los resultados obtenidos muestran que las formulaciones F1 y F2 escaladas en los prototipos P1 y P2 a los cuales se les aplicó un escrutinio en base al principio de semejanza a volúmenes de 1 y 10 L mantuvieron constantes sus propiedades fisicoquímicas y microbiológicas, actividad que se estima permanecerá constante con el aumento de escala.

### **Capítulo 8. Sugerencias para trabajos futuros**

- Realizar un análisis económico para determinar la rentabilidad del proyecto y precisar su seguimiento en el proceso de investigación y desarrollo (I + D) a una etapa semi-industrial.

## Capítulo 9. Bibliografía

- Anaya-Durand. A., Pedroza-Flores H. (2008).** Escalamiento, el arte de la ingeniería química: planta piloto, el paso entre el huevo y la gallina. *Tecnología Ciencia, Educación* 23(1), 31-39.
- Ávila-Arce A., González-Milán D. J. (2012).** La competitividad de las fresas (*Fragaria* spp.) Mexicanas en el mercado nacional, regional y de Estados Unidos. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 9(1), 17-27.
- Buckingham E. (1914).** Illustrations of the use of dimensional equations. *Physically Similar Systems*, 4(4), 345-376.
- Canónico-Franco M. (2003).** *Agregación en gránulos de almidón*. (Tesis de Doctor). Recuperado de <http://qro.cinvestav.mx/~aherrera/tesisEstudiantes/tesisMarciaCanonico.pdf>
- Copyright© Sensagent Corporation. (2013). *Sanitizante*: [diccionario.sensagent.com](http://diccionario.sensagent.com)  
Recuperado de <http://diccionario.sensagent.com/sanitizante/es-es/>
- González-Castellanos R. A. (2000).** *Principios básicos de escalado*. Ciudad de Matanzas, Cuba: Editorial Universitaria del Ministerio de Educación Superior de la República de Cuba.
- Gomez M. H., Aguilera J. M. (1984).** A physicochemical model for extrusion of corn starch. *Journal of Food Science*, 49(1), 40-43
- Hernández-Romero A. S. (2006).** *Evaluación de la actividad enzimática peroxidasa y polifenoloxidasa en dos variedades de fresa (Fragaria x ananassa cv. Chandler y Sweet Charlie) durante estrés por bajas temperaturas*. (Tesis de pregrado). Recuperado de <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ciencias/tesis78.pdf>
- Jonstone, R. E., Thring, M. W. (1957).** *Pilot plants, models and scale-up methods in chemical engineering*. New York, USA: McGraw-Hill.

- Lai L. S., Kokini J. L. (1991).** Physicochemical changes and rheological properties of starch during extrusion. *Biotechnology Progress*, 7(1), 251-266.
- McCabe W. L., Smith J. C., Harriott P. (2007).** *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. México D.F., México: McGraw-Hill. (7ª Edición).
- Medina J. A., Salas J. C. (2008).** Caracterización morfológica del gránulo de almidón nativo: apariencia, forma, tamaño y su distribución. *Revista de ingeniería*, 27(1), 56-62.
- Perry R. H., Green D. W., Maleney J. O. (1989).** Matemáticas.. En D. W Green. (6ta Edición). *Manual del ingeniero químico tomo 1*. (421-424). La Habana, Cuba: Revolucionaria.
- Palluzi R., Matty. L. (1983).** The payoff in pilot plants-high-accuracy mass balancing in catalyst screening. *Chemical Engineering Progress*, 79(8), 41-45.
- Reddy B., Angers P., Gosselinn A., Arul J. (1998).** Characterization and use of essential oil from *thymus vulgaris* against *Botrytis cinerea* and *Rhizopus stolonifer* in strawberry fruits. *Phytochemistry, volumen (1)*, 515-1 520
- Reddy M. V., Belkacemi K., Corcuff R., Castaigne F., Arul J. (2000).** Effect of pre-harvest chitosan sprays on post-harvest infection by *Botrytis cinerea* and quality of strawberry fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 20(1), 39-51.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2017). *Fresa, delicia mundial*. Santa Cruz Atoyac, Ciudad de México, México: gob.mx. Recuperado de <https://www.gob.mx/sagarpa/articulos/fresa-delicia-mundial?idiom=es>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2002). *NMX-FF-062-SCFI-2002*: [www.sagarpa.gob.mx](http://www.sagarpa.gob.mx). Recuperado de [http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Lists/Instrumentos%20Tcnicos%20Normalizacin%20y%20Marcas%20Colecti/Attachments/90/NMX\\_FRESA.pdf](http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Lists/Instrumentos%20Tcnicos%20Normalizacin%20y%20Marcas%20Colecti/Attachments/90/NMX_FRESA.pdf)
- Shao X., Xu F., Wang H., Cheng S. (2013).** Effects and possible mechanisms of tea tree oil vapor treatment on the main disease in postharvest strawberry fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 77(1), 94-101.

**Sivarooban T., Hettiarachch N.S, Johnson M.G. (2008).** Physical and antimicrobial properties of grape seed extract, nisin, and EDTA incorporated soy protein edible films. *Food Research International*, 41(8), 781-785.

**Trambouze, P. (1979).** Reactor scaleup philosophy. *Chemical Engineering*, 10(1) 122-130

**Trambouze, P. (1990).** Reactor scaleup methodology. *Chemical Engineering Progress*. 86(2). 3-31.

**Tokarsky O., Schneider K.R., Berry A., Sargent S.A., Sreedharan A. (2015).** Sanitizer Applicability in a Laboratory Model Strawberry Hydrocooling System. *Postharvest Biology and Technology*, 101(1), 103-106.

**Tovar-Benítez T. (2008).** *Caracterización Morfológica y Térmica del Almidón de Maíz (Zea mays L) Obtenido por Diferentes Métodos de Aislamiento.* (Tesis de pregrado). Recuperado de <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/handle/231104/508/Caracterizacion%20morfologica%20y%20termica%20almidon%20de%20maiz.pdf;jsessionid=84D527E4F9DB0D9D1F5CE5F4A9093DD2?sequence=1>

Yumpu© (2018) *NMX-BB-040-SCFI-1999.* Suiza: Yumpu.com. Recuperado de <https://www.yumpu.com/es/document/view/14197834/nmx-bb-040-scfi-1999-metodos-generales-de-analisis->

**Wiseman S., Domany E. (1998).** Finite-size scaling and lack of self-averaging in critical disordered systems. *Physical review letters*, 81(1), 22-25

Wikipedia Foundation, Inc. (2018). *Fragaria.* Recuperado de <http://www.wikiwand.com/en/Fragaria#/Footnotes>

## Capítulo 10. Apéndices

### I Escala de McFarland (Densidad Óptica D.O. de 0.5)

Los patrones de McFarland se utilizan como patrones de turbidez en la preparación de suspensiones de microorganismos. El patrón 0.5 de McFarland tiene una aplicación especial en la preparación de inóculos bacterianos para la realización de pruebas de actividad antimicrobiana.

Procedimiento:

- a) Tomar una pequeña cantidad de inóculo (*C. albicans*) y dispersar en CMH, homogenizar con un vortex
- b) Realizar lecturas en un espectrofotómetro
  - I. Ajustar el espectrofotómetro a una longitud de onda igual a 600 nm
  - II. Blanco: en una celda colocar CMH y asignar valor de 0
  - III. Inoculo: en una celda colocar CMH con inoculo (*C. albicans*), realizar la lectura en el espectrofotómetro hasta llegar a una absorbencia de 0.5

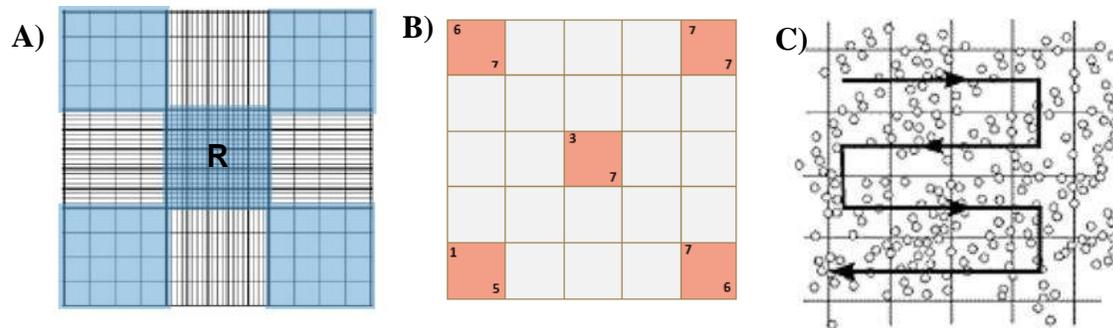
**Nota<sup>1</sup>:** Si al realizar la lectura, el valor obtenido es mayor a 0.5 devolver la muestra al tubo de procedencia y adicionar más caldo. Si al realizar la lectura, el valor obtenido es menor a 0.5, adicionar más inóculo.

- c) Repetir el mismo procedimiento para para *S. aureus* y *E. coli*

**Nota<sup>2</sup>:** El orden para trabajar es *C. albicans*, *S. aureus* y por último *E. coli*.

### II Cuantificación de esporas en cámara de Neubauer

El hematocitómetro o cámara de Neubauer es un instrumento ideado para contar células sanguíneas y se puede usar también para estimar la concentración de esporas en una suspensión acuosa. El hematocitómetro es una cámara de conteo adaptada al microscopio que tiene una depresión en cuyo fondo tiene una cuadrícula de dimensiones conocidas; donde el área sombreada “R”( Figura 24, A) corresponde a 1 mm<sup>2</sup> con una depresión central de 0.1 mm y por lo tanto un volumen de 0.1 mm<sup>3</sup> equivalente a 1 μL.



**Figura 26.** Cámara de Neubauer A) Cuadrícula representativa de un hematocitómetro, B) Representación del cuadrante “R” y C) Sentido del conteo de esporas.

Procedimiento:

- Homogeneizar con el Vortex la suspensión de esporas previamente lavadas.
- Colocar la suspensión de esporas sobre la cuadrícula de la cámara de Neubauer y cubrir con el cubreobjetos.
- Fijar la cámara de Neubauer al microscopio y enfocar el lente del microscopio hasta que se puedan observar las esporas.
- Cuantificar el número de esporas que hay en cada uno de los 5 subcuadrantes ver Figura 24, B).



http://mlab.im/IDdqPYz  
FE DE ERRATAS:

## INFORME DE ENSAYOS

NUMERO DE INFORME: 233549/2017  
FECHA DE IMPRESION: JUEVES, 18 DE ENERO DE 2018  
FECHA DE REIMPRESION: ---  
LEA EL CÓDIGO BIDIMENSIONAL O INGRESE A LA URL DESDE SU NAVEGADOR PARA VALIDAR EL INFORME  
--- NO HAY ERRATAS ---

### DATOS DEL CLIENTE

COMPañIA: INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN QUIMICO BIOLÓGICAS DE LA UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
DIRECCION: FRANCISCO J. MUJICA ES7N DIFICIO B-3, FELICITAS DEL RIO  
CIUDAD: MORELIA, MICHOACAN  
ATENCIÓN: MAURO MANUEL MARTINEZ PACHECO

### IDENTIFICACION DE LA MUESTRA

LUGAR DE MUESTREO: LABORATORIO  
DESCRIPCION DE LA MUESTRA: F6  
PROCEDIMIENTOS DE MUESTREO: ---  
PERIODO DE ENSAYOS: DEL VIERNES, 22 DE DICIEMBRE DE 2017 AL JUEVES, 18 DE ENERO DE 2018  
REFERENCIA: OTRO TIPO DE MUESTRA: PUNTUAL  
NATURALEZA: OTRO MUESTREADA POR: CLIENTE

### DATOS DE MUESTREO

FOLIO DE LA MUESTRA: 233549/2017 MUESTREADOR: CLIENTE  
APARIENCIA DE LA MUESTRA: --- OLOR DE LA MUESTRA: ---  
FECHA DE MUESTREO: Jueves, 21 de Diciembre de 2017 HORA DE MUESTREO: ---  
FECHA RECEPCION: Viernes, 22 de Diciembre de 2017 HORA DE RECEPCION: 16:41 h

### CONDICIONES AMBIENTALES AL MOMENTO DE MUESTREO

TEMPERATURA DE BULBO SECO: --- HUMEDAD RELATIVA: ---  
PRESION BAROMETRICA: --- CONDICION DEL CIELO: ---

### EQUIPO UTILIZADO EN LOS ANALISIS

Muestreo: Sonda Multiparámetro para medir Temperatura, pH, Conductividad Eléctrica y Oxígeno Disuelto clave: MLI-504, MLI-550, MLI-590, MLI-678, MLI-679, MLI-704, MLI-731, MLI-799, MLI-805, MLI-849. Medidores de Flujo y Automuestreadores clave: MLI-564, MLI-565, MLI-566, MLI-820, MLI-954, MLI-983, MLI-935, MLI-936, MLI-937, MLI-961, MLI-962, MLI-966  
Colorimetrías: Espectrofotómetros de UV-vis clave: MLI-046, MLI-642, MLI-642, MLI-869, MLI-109, MLI-651  
Metales: Espectrofotómetro clave: MLI-031, MLI-741. Generador de Hidruros clave: MLI-032, MLI-950, MLI-747. Hornos de grafito clave: MLI-745. Espectrofotómetro simultáneo de plasma y emisión atómica ICP-OES clave MLI-667.  
Potenciometrías: Medidores de ion selectivo clave: MLI-353, MLI-082, MLI-713, MLI-076, MLI-819; Medidores de pH clave: MLI-021, MLI-737, MLI-262, MLI-867, MLI-715, MLI-421, MLI-730, MLI-847, MLI-716, Medidor de conductividad clave: MLI-846  
Gravimetrías: Balanzas Analíticas clave: MLI-527, MLI-568, MLI-569, MLI-711, MLI-712, MLI-736, MLI-795, MLI-896  
Microbiología: Incubadoras clave: MLI-008, MLI-011, MLI-012, MLI-013, MLI-014, MLI-555, MLI-556, MLI-787, MLI-835, Estufas clave: MLI-330, MLI-331, Baño María clave: MLI-027, MLI-300, MLI-328, MLI-675, MLI-899, Hornos clave: MLI-766, Gabinete de Seguridad Biológica clave: MLI-483, GDS ASSURANCE clave: MLI-870, Lector Elisa clave MLI-502  
\* Algunos equipos podrían no ser utilizados, dependerá de los parámetros analizados.

### ENVASE, VOLUMEN Y PRESERVACION DE LA MUESTRA

NO. REC.	GRUPO DE ANÁLISIS	IDENTIFICACIÓN DEL ENVASE	CANTIDAD	PRESERVACIÓN
1	MICROBIOLÓGICOS	EMPAQUE COMERCIAL	0,5 L	SIN PRESERVACIÓN

### RESULTADOS DE LA MUESTRA PUNTUAL

LIMITES MAXIMOS QUE APLICAN DE ACUERDO A: NORMA MEXICANA NMX-BB-040-SCFI-1999 MÉTODOS GENERALES DE ANÁLISIS. DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD ANTIMICROBIANA EN PRODUCTOS GERMICIDAS

Nombre	Método	Inicio de análisis	Resultado	Unidades	Incert. al 95% k=2	Límite máx.	Acreditaciones/Aprobaciones EMA CNA SSA SGR SUB CON	Analista
RETO MICROBIANO	NMX-BB-040-SCFI-1999	28-12-2017 02:52 s	----	---	---	---	•	T.T.V.
E. coli ATCC 11229	NMX-BB-040-SCFI-1999	28-12-2017 02:52 s	99,9999	% reducción	---	99,999%/30s	•	T.T.V.
S. aureus ATCC 6538	NMX-BB-040-SCFI-1999	28-12-2017 02:52 s	99,9999	% reducción	---	99,999%/30s	•	T.T.V.
Candida albicans ATCC 10231	NMX-BB-040-SCFI-1999	28-12-2017 02:52 s	99,9999	% reducción	---	99,999%/30s	•	T.T.V.

OBSERVACIONES: -- NO HAY OBSERVACIONES --

EMA: Entidad Mexicana de Acreditación, CNA: Comisión Nacional del Agua (Aprobación), SSA: COFEPRIS (Aforización), SGR: SAGARPA (Aprobación), CON: Parámetro contratado fuera del alcance de acreditación de Microlab Industrial, SUB: Parámetro subcontratado dentro del alcance de acreditación de Microlab Industrial, N.E. No especificado, N.A. No Aplica, Los valores reportados como " < " menor a " son menores al Límite Práctico de Cuantificación del Método (LPC).