



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**PREPARACIÓN DE UNA MEMBRANA COMPUESTA PARA EL PROCESO DE
MICROFILTRACIÓN CON BASE POROSA Y ESTRATO SELECTIVO DENSO (PET)**

Robin Isael Fuentes González

Asesorado por el M.A. Ing. Renato Giovanni Ponciano Sandoval

Guatemala, febrero de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PREPARACIÓN DE UNA MEMBRANA COMPUESTA PARA EL PROCESO DE
MICROFILTRACIÓN CON BASE POROSA Y ESTRATO SELECTIVO DENSO (PET)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ROBIN ISABEL FUENTES GONZÁLEZ

ASESORADO POR EL M.A. ING. RENATO GIOVANNI PONCIANO SANDOVAL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma Ramos
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortiz Castillo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PREPARACIÓN DE UNA MEMBRANA COMPUESTA PARA EL PROCESO DE MICROFILTRACIÓN CON BASE POROSA Y ESTRATO SELECTIVO DENSO (PET)

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 17 de julio de 2014.

Robin Isael Fuentes González



Guatemala, 21 de agosto de 2015

Ingeniero

Víctor Manuel Monzón Valdez

Director de la Escuela de Ingeniería Química

Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Monzón:

Reciba por medio de la presente un cordial saludo de mi parte. El motivo por el que me dirijo a usted es para hacer de su conocimiento que he revisado y corregido el Informe Final del trabajo de graduación del estudiante Robin Isael Fuentes González, carné universitario No. 200819288, denominado "PREPARACIÓN DE UNA MEMBRANA COMPUESTA PARA EL PROCESO DE MICROFILTRACIÓN CON BASE POROSA Y ESTRATO SELECTIVO DENSO (PET)". Es mi opinión que el trabajo está listo para ser sometido a la revisión y escrutinio de los revisores nombrados por la Escuela de Ingeniería Química, por lo que por este medio le comunico mi **APROBACIÓN** del mismo y solicito que se le dé el trámite correspondiente.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted con todo respeto.

Atentamente,
"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Renato Giovanni Ponciano Sandoval

Asesor de Tesis
Profesor Titular VI

Renato Giovanni Ponciano Sandoval
Ingeniero Químico
No. Colegiado 826



Guatemala, 22 de octubre de 2015.
Ref. EIQ.TG-IF.073.2015.

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **050-2014** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Robin Isael Fuentes González**.
Identificado con número de carné: **2008-19288**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

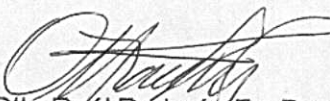
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

PREPARACIÓN DE UNA MEMBRANA COMPUESTA PARA EL PROCESO DE MICROFILTRACIÓN CON BASE POROSA Y ESTRATO SELECTIVO DENSO (PET)

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Renato Giovanni Ponciano Sandoval**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Otto Raúl De León De Paz
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.008.2016

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de el estudiante, **ROBIN ISABEL FUENTES GONZÁLEZ** titulado: **"PREPARACIÓN DE UNA MEMBRANA COMPUESTA PARA EL PROCESO DE MICROFILTRACIÓN CON BASE POROSA Y ESTRATO SELECTIVO DENSO (PET)"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, febrero 2016

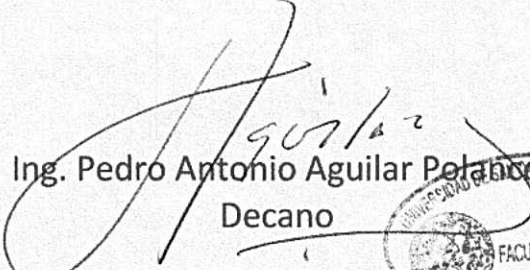
Cc: Archivo
CSWD/de



DTG. 062.2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **PREPARACIÓN DE UNA MEMBRANA COMPUESTA PARA EL PROCESO DE MICROFILTRACIÓN CON BASE POROSA Y ESTRATO SELECTIVO DENSO (PET)**, presentado por el estudiante universitario: **Robin Isael Fuentes González**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, febrero de 2016

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por estar conmigo en todo momento y ser mi pronto auxilio, gracias Señor a tí la honra y la gloria por los siglos de los siglos.
- Mis padres** Eleazar Aníbal Fuentes Miranda y Mertaly Eufemia González Miranda, por sus ejemplos, consejos y sobre todo por ser mi inspiración para alcanzar esta profesión.
- Mis abuelos** Por sus consejerías en todo momento aunque ya no estén conmigo estoy profundamente agradecido.
- Mis hermanos** Miqueas Eleazar, Abdías Blademiro y Eleazar Aníbal Fuentes González, por sus motivaciones y ejemplos en especial a Rony Saúl Fuentes González (q. e. p. d), tu personalidad siempre estará en mi mente.
- Mis familiares** En especial al Ing. Audulio Tul Miranda y esposa Marina Verónica Bautista, por el apoyo incondicional y económico.
- Mis amigos** En especial a José Ovidio Paz y Julio Isaí Santos Mayorga, por formar parte de mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por la vida, salud y sabiduría, y porque de él emana toda buena dadiva.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de formación.
Asesor de trabajo de graduación	Ingeniero Renato Giovanni Ponciano Sandoval, por compartir su experiencia y conocimiento.
Corporación Tuba S. A.	Por trabajar en esta institución, durante toda la carrera.
Área de Tecnología de la madera de la Usac	Por contribuir con el equipo, cristalería y máquinas para el desarrollo de la fase experimental de mi trabajo de graduación.
Luis Chacón Álvarez	Por su servicio y atención en la biblioteca de ingeniería de la Usac, también por recomendarme textos apropiados a mi profesión.
Ministerios Ebenezer	Casa de Dios, lugar de refugio y adoración al Dios altísimo (Jehová de los ejércitos).

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
Hipótesis	XVIII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. MARCO CONCEPTUAL.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación	4
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Membranas de microfiltración.....	7
2.2. Modelos para la microfiltración (μm).....	8
2.2.1. Pruebas de provocación bacteriana	11
2.2.2. Prueba de punto de burbuja	12
2.3. Procesos de separación a través de una membrana	13
2.3.1. Clasificación de los procesos con membrana.....	14
2.4. Tipos de membranas.....	15
2.4.1. Membranas simétricas.....	15
2.4.1.1. Membranas microporosas	15
2.4.1.2. Membranas densas no porosas.....	17
2.4.1.3. Membranas cargadas eléctricamente ..	18
2.4.2. Membranas asimétricas.....	18

	2.4.2.1.	Membranas líquidas, cerámicas y metálicas	19
2.5.		Métodos para la preparación de membranas poliméricas.....	19
	2.5.1.	Método de embadurnado	20
	2.5.2.	Método de sinterización	20
	2.5.3.	Método de extrusión	20
2.6.		Tecnología de separación física con membrana.....	21
	2.6.1.	Selectividad	22
	2.6.2.	Capacidad de retención	22
2.7.		Preparación de una membrana de microfiltración compuesta.....	24
2.8.		Tipos de flujo en una separación por membranas	25
2.9.		Química del tereftalato de polietileno	26
	2.9.1.	Propiedades físicas	27
3.		DISEÑO METODOLÓGICO.....	29
3.1.		Variables de operación.....	29
	3.1.1.	Diseño experimental.....	30
3.2.		Delimitación del campo de estudio.....	31
	3.2.1.	Planteamiento del problema.....	31
		3.2.1.1. Definición del problema.....	31
		3.2.1.2. Delimitación del problema	31
3.3.		Recursos humanos disponibles	32
3.4.		Recursos y materiales disponibles (equipo, cristalería y reactivos).....	32
	3.4.1.	Recursos materiales disponibles.....	32
3.5.		Técnica cualitativa y cuantitativa	34
	3.5.1.	Técnica cualitativa.....	34
	3.5.2.	Técnica cuantitativa.....	34

3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	35
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	38
3.8.	Análisis estadístico	39
3.8.1.	Tratamiento estadístico de datos.....	39
3.8.1.1.	Cálculos estadísticos	39
3.8.1.2.	Análisis Anova multivariable	40
4.	RESULTADOS	43
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	57
	CONCLUSIONES	61
	RECOMENDACIONES	63
	BIBLIOGRAFÍA.....	65
	APÉNDICES	69

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Flujo de proceso para microfiltración: a) flujo en extremo cerrado; b) flujo cruzado.....	9
2.	Clasificación de las membranas.....	16
3.	Clasificación de las membranas por su morfología.....	16
4.	Clasificación de las membranas por su estructura.....	17
5.	Caracterización de las distintas filtraciones por membranas.....	24
6.	Detalle de la membrana compuesta preparada.....	25
7.	Detalle de los flujos de alimentación y descarga en una separación por membranas.....	26
8.	Tereftalato de polietileno con estructura interna amorfa.....	27
9.	Diagrama de total de pruebas realizadas método de sinterización.....	30
10.	Diagrama de trabajos preliminares.....	35
11.	Diagrama de trabajos preliminares.....	36
12.	Representación del tamaño de partícula en función del tiempo de operación en el molino de bolas.....	37
13.	Tabulación de la información.....	38
14.	Distribución de poros en función del diámetro promedio para la prueba 5, primera corrida.....	49
15.	Distribución de poros en función del diámetro promedio para la prueba 5, segunda corrida.....	50
16.	Distribución de poros en función del diámetro promedio para la prueba 6, primera corrida.....	51

17.	Distribución de poros en función del diámetro promedio para la prueba 6, segunda corrida	52
18.	Distribución de poros en función del diámetro promedio para la prueba 11, primera corrida.....	53
19.	Distribución de poros en función del diámetro promedio para la prueba 11, segunda corrida	54
20.	Distribución de poros en función del diámetro promedio para la prueba 12, primera corrida.....	55
21.	Distribución de poros en función del diámetro promedio para la prueba 12, segunda corrida	56

TABLAS

I.	Procesos de separación a membrana	15
II.	Cuadro de análisis de variables	29
III.	Distribución de poros prueba 5, primera corrida	43
IV.	Distribución de poros prueba 5, segunda corrida	44
V.	Distribución de poros prueba 6, primera corrida	44
VI.	Distribución de poros prueba 6, segunda corrida	45
VII.	Distribución de poros prueba 11, primera corrida	45
VIII.	Distribución de poros prueba 11, segunda corrida	46
IX.	Distribución de poros prueba 12, primera corrida	46
X.	Distribución de poros prueba 12, segunda corrida	47
XI.	Densidad de poros para las distintas pruebas	47
XII.	Rango en micrómetros donde se obtuvo la mayoría de poros y desviación estándar	48
XIII.	Prueba Anova para analizar la dispersión de datos de un par de pruebas con diferente tiempo de operación	48
XIV.	Prueba Anova para analizar la dispersión de datos de un par de pruebas con diferente porcentaje en peso	49

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
θ	Ángulo de contacto líquido-sólido, para soluciones completamente humectantes.
<i>NaCl</i>	Cloruro de sodio
<i>C_p</i>	Concentración del soluto en el permeado mol/l
<i>C_f</i>	Concentración del soluto en la alimentación mol/l
ΔP	Diferencia de presión en N/m ²
<i>N_w</i>	Flujo de disolvente en kg/(s· m ²)
°C	Grados Celsius
<i>m</i>	Metro
μm	Micrómetro
<i>mm</i>	Milímetro
<i>PET:NaCl</i>	Porcentaje en peso, o razón de masa.
<i>r</i>	Radio promedio de un poro μm
<i>R_m</i>	Resistencia de la membrana en m ² /kg
<i>R</i>	Retención de la membrana $0 \leq R \leq 100$
γ	Tensión superficial de un fluido
<i>PET</i>	Tereftalato de polietileno
μ	Viscosidad de un disolvente en Pa·s

GLOSARIO

Destilación	Separación de dos líquidos miscibles con diferente punto de ebullición, el más volátil se evapora más rápidamente.
Embadurnado	Método para preparar una membrana, se embadurna sobre un soporte, un estrato muy fino del polímero donde se evapora el solvente o medio de dispersión.
Estrato selectivo	Capa principal de la membrana donde se evalúan los poros que caracterizan a la misma.
Extrusión	Método para preparar una membrana, donde el polímero se lleva a estado fluido en el cual adopta la forma deseada al pasar por una boquilla.
Filtración	Proceso unitario de separación de sólidos en suspensión en un líquido mediante un medio poroso, que retiene los sólidos y permite el pasaje del líquido.
Membrana	Es una barrera permeo selectiva entre dos fases.
Microfiltración	Es un proceso de separación física en cual el tamaño de los poros de una membrana determina hasta qué punto son eliminados los sólidos disueltos, la turbidez y los microorganismos, están entre 0,2 a 10 μm .

Micrómetro	Medida de longitud, de símbolo μm , que es la millonésima parte de un metro.
Micrómetro objetivo	Portaobjeto graduado que se utiliza para medir microorganismos en el ocular de un microscopio.
Micrómetro ocular	Lente principal con graduación del ocular de un microscopio, calibrado en función del micrómetro objetivo.
Molino de bolas	Es una máquina para moler diversos minerales y otros materiales: de construcción y materias primas utilizadas en la industria química.
Molino de martillos	Es una máquina que utiliza martillos para reducir el tamaño de partícula, que giran a gran velocidad, el tamaño final de la partícula depende del tamaño de la criba.
Nonofiltración	Es el proceso mediante el cual se hace pasar un fluido a través de una membrana semipermeable a una determinada presión, de forma que se produce una separación basada en el tamaño de las moléculas que pueden atravesar dicha membrana (entre 0,001 y 0,01 μm).

Ósmosis inversa	Utiliza una presión mayor que la presión osmótica, que produce un efecto contrario a la ósmosis. Los fluidos se presionan a través de la membrana, mientras que los sólidos disueltos quedan atrás.
Permeabilidad	Es la capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado.
Permeación	Es un proceso de separación a base de membranas, se ha utilizado desde hace varias décadas para la separación de gases y ha sido aplicado recientemente en el tratamiento de efluentes cargados con compuestos orgánicos volátiles (COV).
Permeado	Es el producto o líquido filtrado, después de una separación física por membrana.
Pervaporación	Es un proceso de separación con membranas aplicado a mezclas líquidas de compuestos miscibles, en el que a partir de una corriente de alimentación se obtienen dos corrientes líquidas, cada una de ellas más concentrada en sus componentes que la alimentación inicial.
PET	Químicamente es un polímero que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el

ácido tereftálico y el etilenglicol. Pertenece al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres, también llamado tereftato de polietileno.

Polímero	Se define como macromoléculas compuestas por una o varias unidades químicas (monómeros) que se repiten a lo largo de toda una cadena.
Porcentaje en peso	Relación peso/peso de PET/NaCl.
Portaobjetos	Es una placa fina de vidrio sobre el cual se disponen muestras para visualizarlas en el microscopio.
PSI	Unidad de presión libra-fuerza por pulgada cuadrada, es una unidad de presión en el sistema anglosajón de unidades.
Punto de fusión	Es la temperatura en la cual se encuentra el equilibrio de fases sólido - líquido, es decir la materia pasa de estado sólido a líquido, se funde en otras palabras.
Retentato	Se refiere a la porción de la separación física retenida por una membrana.
Selectividad	Capacidad de permitir el paso de una especie y restringir el paso de otras.

Sinterización	Método para preparar una membrana a partir del polvo mediante calentamiento del material, ligeramente inferior del punto de fusión, se usa poco en polímeros, más en materiales cerámicos.
Sólido amorfo	Es un estado sólido de la materia, en el que las partículas que conforman el sólido carecen de una estructura ordenada. Estos sólidos carecen de formas bien definidas.
Sólido cristalino	Los sólidos cristalinos están compuestos por átomos cuya estructura están ordenados de manera regular formando por redes cristalinas.
Tamices Tyler	Esta es una serie de tamices estandarizados, usados para la medición del tamaño y distribución de las partículas en un rango muy amplio de tamaño. Las aberturas son cuadradas y se identifican por un número que indica la cantidad de aberturas por pulgada cuadrada.
Ultrafiltración	Es un tipo de filtración por membranas en la cual la presión hidrostática fuerza un líquido contra una membrana semipermeable. Los sólidos suspendidos y los solutos de alto peso molecular son retenidos, mientras que el agua y los solutos de bajo peso molecular atraviesan la membrana.

RESUMEN

En el presente proyecto de investigación, a nivel de trabajo de graduación, se realizaron diferentes pruebas para obtener las condiciones óptimas, para preparar una membrana compuesta para el proceso de microfiltración con base porosa y estrato selectivo denso.

La membrana se compuso de dos capas: una base porosa y un estrato selectivo denso, ambas de tereftalato de polietileno (PET), la base porosa tiene la función de proporcionar mayor resistencia a la membrana, por lo tanto se evaluó el tamaño del poro únicamente en el estrato selectivo denso.

Con respecto a la base porosa se trabajó con un porcentaje en peso de 2:1 (PET:NaCl), a diferencia el estrato selectivo denso se trabajó con diferente porcentaje en peso, siendo estas: 3:1 y 2:1, se realizaron 12 pruebas como se detalla en la figura 9 (página 30), con dos repeticiones para cada una, de las cuales únicamente en 4 se obtuvo resultado positivo, en el resto de pruebas no se obtuvo los estratos respectivos, la razón principal fue por el punto de fusión del polímero (PET) a 260 y 270 °C no fundió pero si a 280 °C.

Posteriormente se trabajó en el Laboratorio de Microbiología de la Escuela de Ingeniería Química de la Usac, se contabilizó y midió el tamaño de los poros en 10 puntos elegidos al azar de cada membrana, obteniendo una mayor densidad de poros en la prueba 5 para la segunda corrida con un valor de 1,03 poros/mm², y la de menor densidad se obtuvo en la prueba 11 para la primera corrida con un resultado de 0,28 poros/mm², para el rango de 0-20 micras, el de mayor relevancia.

En conclusión la mejor combinación y mejores características que se obtuvieron de las doce pruebas fue la 5 para la segunda corrida, con las siguientes variables y valores: temperatura 280 °C, porcentaje en peso 2:1 y tiempo de preparación 15 min, dado que en esta prueba se obtuvo el mayor porcentaje de poros en el rango de 0 a 20 micras con un valor de 21,1 % del total contabilizado, por lo tanto el método utilizado no es factible para preparar membranas de microfiltración que se caracterizan por tener poros con diámetro promedio en el rango de 0,2 a 10 micras.

OBJETIVOS

General

Preparar y caracterizar visualmente una membrana para procesos de microfiltración, determinando las variables de operación como: temperatura, tiempo y porcentaje en peso, que producirán la membrana más apropiada para pruebas experimentales.

Específicos

1. Preparar una membrana de microfiltración empleando el método de sinterización.
2. Determinar la temperatura, tiempo y porcentaje en peso que produzcan una membrana apropiada para procesos de microfiltración.
3. Explicar de manera clara, de qué forma repercute, la temperatura, tiempo de operación y porcentaje en peso en los resultados, realizando una prueba estadística de Anova.
4. Determinar el rango en micras donde se obtendrá la mayor cantidad de poros, de manera global y explicar el motivo del resultado.
5. Determinar la prueba, rango en micras y densidad de poros donde se obtendrán más poros.

Hipótesis

Es factible preparar a nivel laboratorio una membrana de microfiltración compuesta de dos estratos, una base porosa y un estrato selectivo denso, compuesta de tereftalato de polietileno.

Hipótesis nula:

Es posible obtener una gráfica que represente la distribución de poros de cada membrana, con base en la frecuencia de un mismo rango en función del diámetro promedio.

Hipótesis alternativa:

No es posible obtener una gráfica que represente la distribución de poros de cada membrana, con base en la frecuencia de un mismo rango en función del diámetro promedio.

INTRODUCCIÓN

Los procesos de separación física a membrana son bastante nuevos dado que hace aproximadamente 35 años se empezaron a utilizar para separar solutos en un solvente. Tiene la gran ventaja de excluir el uso de aditivos químicos, también consumo de energía relativamente bajo, son versátiles y no emiten gases de efecto invernadero, pero tienen la desventaja de tener corta vida útil y costo de remplazo alto.

Las membranas han ganado un lugar importante en la tecnología química y se utilizan en una amplia gama de aplicaciones. En esta operación unitaria relativamente nueva, la membrana actúa como una barrera semipermeable y la separación ocurre porque la membrana controla la cantidad de movimiento de varias moléculas entre dos fases líquidas, dos fases gaseosas o una fase líquida y una gaseosa. Las dos fases fluidas suelen ser miscibles y la barrera de la membrana impide el flujo hidrodinámico normal.

La propiedad más importante de una membrana es su selectividad o eficiencia, pues de esta depende la restricción y paso de las especies. En separaciones físicas, el objetivo de la membrana es permitir que uno de los componentes de una mezcla pueda permearse fácilmente, mientras se dificulta la difusión del otro u otros componentes.

En esta investigación a nivel de trabajo de graduación se explican los pasos que se emplearon para preparar la membrana.

- a) Se realizaron trabajos preliminares para obtener la materia prima óptima, para realizar las pruebas.
- b) Se pesó y compactó la materia prima según el porcentaje en peso requerido.
- c) Se transfirió al horno lo previamente preparado en el inciso b, para ser analizado con el método de sinterización.
- d) Se programó la temperatura y tiempo de operación en el horno.
- e) Se obtuvo las membranas después de transferirlas en un baño de maría.
- f) Se contó y midió el tamaño de los poros.
- g) Se obtuvo una gráfica que represente la distribución de poros de cada membrana en función del diámetro promedio de los poros.
- h) Se interpretó los resultados.
- i) Se hizo recomendaciones con base en resultados obtenidos.

La membrana que se preparó es compuesta dado que tuvo dos capas definidas de la siguiente manera:

- Base porosa de 2,5 mm de espesor (aproximado)
- Estrato selectivo denso de 1 mm de espesor (aproximado)

El propósito de esta investigación, es obtener una membrana que tenga la suficiente selectividad para separar microsolutos de un solvente, por lo general este tipo de membranas son empleadas para purificar agua potable, este proceso requiere una presión moderadamente baja aplicada en la parte del retentato para una separación con gran productividad.

Este tipo de membranas logran gran productividad debido al tamaño promedio de los poros, son útiles para separar microorganismos disueltos desde 2 a 10 micrómetros, mientras que las separaciones tipo nanofiltración logran baja productividad dado que los poros de la membrana tienen un diámetro promedio entre 1 a 10 nanómetros, y la otra diferencia es de que requiere una presión más alta en el retentato que la microfiltración.

La tecnología de separación por membranas tiene gran diversidad de aplicaciones clasificadas como primera generación, siendo las siguientes: microfiltración, ultrafiltración, ósmosis inversa, nanofiltración y diálisis, y procesos de segunda generación tales como: separación de gases, pervaporación, destilación a membranas, contactores a membrana y permeación a membranas.

Existen varios métodos para la preparación de membranas poliméricas, dentro de estas están:

- Embadurnado
- Sinterización
- Extrusión

Para esta investigación se utilizó el método de sinterización dado que es el más factible o viable económicamente hablando, su procedimiento es muy versátil, dado que consiste en preparar la membrana a partir del polvo polimérico mediante calentamiento del material (ligeramente abajo del punto de fusión) hasta que lograr la adhesión de las partículas.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. Antecedentes

Hasta la fecha en Guatemala no se ha realizado diversidad de investigaciones respecto al tema. Sin embargo, en mayo de 2013, se realizó una investigación por Edgar Alejandro Arana Valenzuela, para su trabajo de graduación titulado *Instalación de estación experimental e implementación práctica de laboratorio para el curso de separación por membranas selectivas* al conferírsele el título de ingeniero químico en la Universidad de San Carlos de Guatemala.

“La investigación consistió en la implementación de un sistema de separación por membranas selectivas, para que los estudiantes de dicho curso pudieran realizar una práctica de laboratorio, el cual consiste en separar el hierro de una solución de sulfato ferroso heptahidratado, por medio de tratamiento químico y una membrana de microfiltración de 10 micras fabricada de celulosa”.¹

En 1996, Fidencio Hernández Pérez del Instituto Mexicano del Petróleo, comparte a la Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal, su proyecto académico titulado: *Preparación de membranas poliméricas para el endulzamiento de gas natural*.

¹ ARANA VALENZUELA, Edgar Alejandro. *Instalación de estación experimental e implementación de práctica de laboratorio para el curso de separación por membranas selectivas*. p. 66.

El objetivo de este trabajo de investigación fue preparar membranas poliméricas para endulzar el gas natural proveniente de Nuevo Pemex. Estas membranas sintetizadas en laboratorio tienen la siguiente formulación:

Acetato de celulosa	16,96 % en peso
Mg (Cl ₃) ₂	1,43 %
Acetona	69,04 %
H ₂ O	12,57 %

Los espesores de las membranas variaron entre 33 y 58 μm . La remoción de CO₂ y H₂S del gas natural se desarrolló en un intervalo de temperatura de 25 a 30°C, con una presión entre 14 y 20 Kg/cm², la evaluación se llevó a cabo por análisis químico del permeado, con una alimentación de 3,291 mol de CO₂, el permeado pasa a 13,14% mol en el mejor de los casos, para el H₂S, este varía de 0,938 a 3,138% mol.²

En 2010, La Serena Chile publicó un artículo citado por SCIELO, en su documento *Elaboración de membranas poliméricas porosas a partir de cristales coloidales*; que describe la elaboración de membranas poliméricas porosas, a partir de partículas de sílice. El método empleado permitió obtener diferentes diseños dependiendo del tamaño de las partículas y del número de capas involucradas en los depósitos. Las membranas se elaboraron empleando dos métodos: por deposición vertical de las partículas sobre un sustrato de vidrio y por la técnica de Langmuir-Blodgett. Para el primer método se obtuvo poros cuyos diámetros medios fueron de 290 nm, con desviación estándar de 2,57 % y para el segundo 1090 nm, y desviación estándar de 4,67 %.

² HERNÁNDEZ PÉREZ, Fidencio. *Preparación de membranas poliméricas para el endulzamiento de gas natural*. En línea file:///C:/Users/USER/Desktop/antecedentes/tesis%202.htm. Consulta 02/08/2015.

En el 2009, se realizó una investigación de graduación por Diana Marcela González Rodríguez, de la Universidad Nacional de Colombia, titulado: *síntesis y caracterización de una membrana polimérica de intercambio iónico*, se realizaron pruebas importantes, para luego fabricar una membrana polimérica capaz de conducir cationes. “El método de aminación fue utilizado en la síntesis de la membrana, se preparó a partir de polímeros que tuvieron grupos funcionales sulfonato y carboxilato, estos grupos electronegativos son balanceados por iones de carga positiva, que son fácilmente transportados de un grupo a otro, neutralizando de esta manera la electronegatividad de la solución”.³

De la investigación realizada se concluye que los procedimientos para fabricar la membrana, son los siguientes:

- Mezcla y reacción de los reactivos, es decir modificación del polímero base.
- Secado del polímero.
- Lavado (neutralización del pH).
- Preparación de la membrana.
- Inmersión en solución alcalina.
- Secado.
- Caracterización de la membrana.

³ GONZÁLEZ RODRIGUEZ, Diana Marcela. *Síntesis y caracterización de una membrana de intercambio aniónico con aplicación en celdas de combustible alcalinas*. p. 29.

1.2. Justificación

En el presente proyecto de investigación, a nivel de trabajo de graduación, se realizó con el fin investigar sobre procesos de separación física microscópica de solutos (bacterias y otros microorganismos como: pigmentos de pintura, microorganismos de la levadura, materia en suspensión como células de un caldo de fermentación, partículas en pasteurización de la cerveza.) en un solvente (agua, leche, jugo, entre otros) mediante la preparación de una membrana polimérica de microfiltración, compuesta por dos capas:

- Base porosa de tereftalato de polietileno (PET) con un espesor máximo aproximado de 2,5 milímetros.
- Estrato selectivo denso de tereftalato de polietileno (PET) con un espesor máximo de 1 milímetro.

Las variables de preparación fueron: temperatura, tiempo y porcentaje en peso de PET:NaCl, pues el objetivo primordial de esta investigación es comprobar si es factible preparar una membrana de esta índole, y concluir con los valores de las variables, o por lo menos determinar la combinación que permita obtener una membrana con características parecidas a una de microfiltración.

Las membranas de esta índole tienen diversas aplicaciones, pero la más importante en Guatemala es para la purificación de agua potable, una de las funciones que tienen es sustituir a clarificadores, para disminuir la turbidez del agua.

Otra razón fundamental por la que se hizo esta investigación, es para seguir innovando técnicas que permitan obtener una membrana con poros de diámetro promedio en el rango de 0,2 a 10 μm .

También es necesario concluir y recomendar según los resultados obtenidos, para mejorar investigaciones futuras que permitan idealizar la tecnología de separación por membranas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Membranas de microfiltración

En la mayoría de casos este tipo de membranas son orgánicas, el diámetro promedio de los poros está comprendido entre 0,2 a 10 μm , están constituidas principalmente de: polipropileno y polímeros de distinta composición.

Este tipo de membrana se utiliza principalmente para el tratamiento de agua potable como una alternativa de los procesos fisicoquímicos convencionales.

El sistema funciona mediante la aplicación de presión por cualquiera de los lados de la membrana. Las partículas que se separan son de mayor tamaño que las de ultrafiltración. Algunos ejemplos de estas partículas son: sólidos en suspensión, partículas en pasteurización de la cerveza, colorantes y células de levadura entre otros.

Una membrana es una separación física. El diámetro promedio del poro es lo que determina la capacidad de permitir el paso de una especie y restringir la de otras, o sea su permeabilidad. Los microorganismos con diámetro promedio mayor a los poros de la membrana son retenidos completamente. Por el contrario, las partículas más diminutas que los poros son retenidos parcialmente en la membrana dependiendo de su selectividad.

Una membrana es una interface entre dos fases adyacentes que actúan como una barrera selectiva, regulando el transporte de sustancias entre los dos compartimientos. Las principales ventajas de la tecnología de membranas, en comparación con otras operaciones en ingeniería química, están relacionadas con este principio único de separación.

Las separaciones con membranas no requieren aditivos químicos, y se pueden operar isotérmicamente a temperaturas bajas, en comparación con otros tipos de separación física que necesitan altos contenidos energéticos como la destilación por ejemplo.

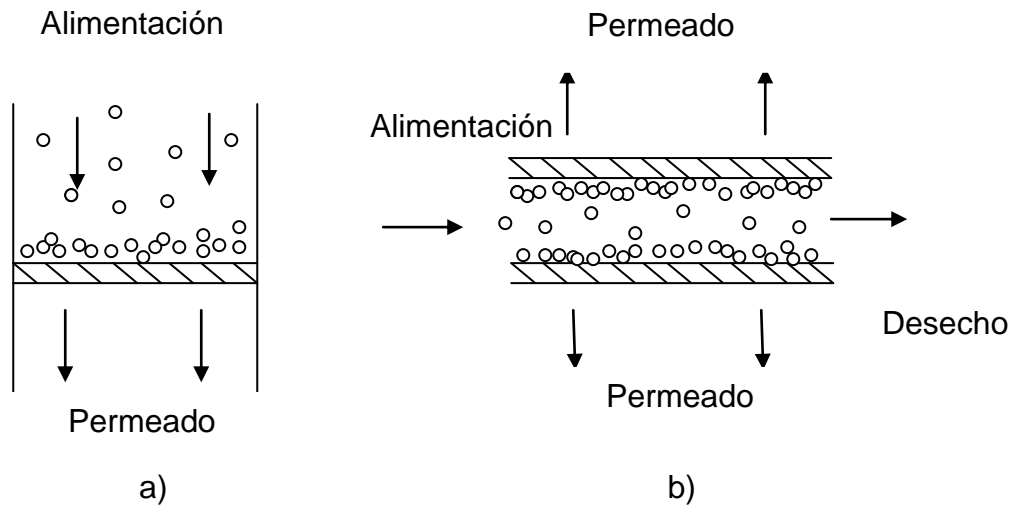
2.2. Modelos para la microfiltración (μm)

El diámetro promedio de los poros de este tipo de membranas es mayor a los de ósmosis inversa y ultrafiltración. Generalmente, la caída de presión que se emplea varía de: 1 a 50 psi. La estructura de las membranas son sumamente variados, pero por lo general se componen de: productos cerámicos y poliméricos.

En realidad existe una amplia gama de diseños en donde la membrana tiene la misma función, las geometrías más importantes incluyen: tipo espiral, de placa, filtros de cartucho tipo plegado y en casos especiales se usan cartuchos tipo enroscado desechable.

- Modelo de flujo de microfiltración de extremo cerrado: en muchas filtraciones de proceso continuo, los flujos se alimentan con este tipo de modelo, y la membrana reemplaza al papel filtro convencional. Las partículas se acumulan con el tiempo en forma de torta, el producto clarificado se filtra por la membrana, como se ilustra en la figura 1a, representada por la ecuación 1.

Figura 1. **Flujo de proceso para microfiltración: a) flujo en extremo cerrado; b) flujo cruzado**



Fuente: GEANKOPLIS, Christie John. *Procesos de transporte y principios de separación*, p. 906.

$$N_w = \frac{\Delta P}{\mu(Rm + Rc)} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

N_w : flujo del disolvente en $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$.

ΔP : diferencia de presión en Pa (pascal).

μ : viscosidad del disolvente en $\text{Pa} \cdot \text{s}$.

Rm : soporte de la membrana en m^2/kg .

Rc : resistencia de la torta en metro cuadrado por kilogramo, la cual aumenta con el tiempo debido al crecimiento de la torta.

- Modelo con flujo cruzado: la alimentación opera de manera uniforme a la posición de la membrana, en otras palabras directamente tangencial. El permeado se difunde por la membrana en posición perpendicular, el fluido lleva partículas a la superficie de la membrana formando una película en todo el área de contacto, como se observa en la figura 1b.

Este tipo de alimentación es eficaz para evitar todo tipo de ensuciamiento o crecimiento de la torta, permitiendo que se mantengan flujos relativamente altos.

Las membranas de esta índole (microfiltración) se utilizan para retener la filtración de alguna partícula o una bacteria a través de esta. Por lo tanto, la distribución de poros de la membrana no debe tener poros muy grandes, es extremadamente importante realizar varias pruebas que caractericen el diámetro promedio de los poros.

“La caracterización de los poros ha sido hasta la fecha uno de los inconvenientes más grandes para los fabricantes. El diámetro promedio de poro de estas membranas parece estar entre 5 micras. La capacidad de una membrana para filtrar las bacterias a partir de soluciones depende de la distribución de poros”.⁴

⁴ BAKER, Richard W. *Membrane technology and applications*. p.33.

“La industria ha adoptado dos pruebas bacterianas para medir el tamaño promedio de los poros. Las pruebas se basan en dos tipos de bacteria: *Marcescens Serrata*, para obtener un diámetro promedio de 0,45 μm , y *Pseudomonas diminuta*, para obtener un diámetro promedio de 0,22 μm ”.⁵

Estas pruebas se han cambiado varias veces durante los últimos años, pero por convención si una membrana tiene poro promedio de 0,45 micras está completamente apta para filtrar. La mayoría de las membranas de microfiltración comerciales tienen tamaño de poro promedio entre: 0,22 a 0,45 micras utilizando las pruebas mencionadas. Las membranas con tamaños de poro más grandes o pequeños se preparan por pruebas de penetración de partículas de látex o de punto de burbuja.

Actualmente, la mayoría de las pruebas de provocación bacteriana se realizan con microorganismos *pseudomona diminuta*. Este microorganismo tiene un tamaño promedio entre 0,3 a 0,4 micras, aunque el tamaño varía significativamente con las condiciones de cultivo. En un medio de cultivo rico, se pueden formar poros más grandes. Por lo tanto, para obtener resultados consistentes, las características de cultivo deben ser cuidadosamente monitoreados.

2.2.1. Pruebas de provocación bacteriana

Requieren, técnicas de laboratorio bastante cuidadosas y un período de incubación de varios días antes de que los resultados estén disponibles. Por esta razón, se realizan pruebas secundarias basadas en la filtración de partículas látex, pues estas se han desarrollado con más frecuencia, este tipo de pruebas obtienen diámetros de partícula de 0,1 a 10 micras.

⁵ MASON. Molecular Physics. p.13.

Para este tipo de prueba se filtra la solución en la membrana, el número de partículas de permeado determina la solución de filtrado de una segunda prueba con una membrana de filtro pantalla. El filtro pantalla captura las partículas látex para una fácil filtración y formación de poros.

El rendimiento de las membranas en las pruebas de provocación bacterianas a menudo se cuantifica por un valor de reducción logarítmico (LRV), definido como:

$$LRV = \log_{10} \left(\frac{cf}{cp} \right) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

Cf: concentración de bacterias en la solución de desafío.

Cp: concentración en el permeado.

LRV: en farmacéutica y aplicaciones electrónicas, se requiere un LRV de 7 u 8, no así para otras aplicaciones.

2.2.2. Prueba de punto de burbuja

La prueba de punto de burbuja es simple, rápida y viable, es el método utilizado para caracterizar las membranas de microfiltración. La membrana es primero humedecida con un líquido adecuado, normalmente agua para las membranas poliméricas y metanol para otro tipo de materiales. La membrana se coloca sobre un soporte con una capa de líquido en la parte superior.

Posteriormente el aire se alimenta a la parte inferior de los estratos, aumentando lentamente la presión, hasta que la primera cadena continua de aire forme burbujas en la superficie de la membrana. Esta presión se llama punto de burbuja y es una medida que caracteriza los poros más grandes de la membrana.

La presión del punto de burbuja puede estar relacionada con el diámetro de poro de la membrana, r , por la ecuación 3.

$$\Delta P = \frac{2\gamma \cos \theta}{r} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

Δp : presión del punto de burbuja.

γ : tensión superficial del fluido.

r : radio promedio de poro en μm .

θ : es el ángulo de contacto líquido-sólido. Para soluciones completamente humectantes, θ es 0° así $\cos\theta$ es igual a 1.

2.3. Procesos de separación a través de una membrana

“Las membranas pueden considerarse físicamente como láminas delgadas que suelen separar dos fases globales, y que controlan el transporte de materia entre estas. Además, típicamente la membrana se mantiene estacionaria contra gradientes de presión externos y resistencia viscosa interna mediante alguna restricción mecánica, normalmente una malla de alambre o una estructura equivalente”.⁶

El transporte pasivo de masa de una fase a otra de la membrana en general se debe a: un gradiente de presión, gradiente de concentración, potencial químico, diferencia de temperatura y campo eléctrico.

⁶ BIRD R. Byron. *Fenómenos de transporte*. p. 923.

La estructura de barrera de las membranas se puede clasificar de acuerdo a la tabla I, para este caso se asume que el gradiente a través de la membrana es la presión.

2.3.1. Clasificación de los procesos con membrana

- Difusividad en un sólido. Por lo general cuando existe este caso, el contacto de fases es: sólido- gas, dependiendo del peso molecular y tamaño de moléculas del gas, así será la velocidad de difusión.
- Diálisis. Para este proceso la membrana se utiliza para separar solutos en solventes principalmente, el fenómeno de transporte de masa depende de la distribución de poros de la membrana. Por lo general funcionan para separar ácido sulfúrico de sulfatos y otro tipo de metales en solución acuosa.
- Ósmosis inversa. Entre la solución de soluto y disolvente puro se coloca la membrana que impide el paso del soluto de bajo peso molecular. El disolvente se difunde hacia la solución por ósmosis. Como su nombre lo dice es una operación inversa parecida a la desalinización de agua.
- Ultrafiltración. Este proceso, se distingue de otros por tener la capacidad de separar solutos de alto peso molecular, por ejemplo, minerales, proteínas principalmente y utilizan membranas poliméricas.
- Cromatografía por permeación en gel. En general esta operación se utiliza, para concentrar sustancias muy valiosas o sustancias químicas complejas, el motor de la separación es el gradiente de concentración.

Tabla I. **Procesos de separación a membrana**

Procesos de primera generación		Procesos de segunda generación	
Proceso	Rango de presión (bar)	Proceso	presión (Psi) de vacío
Microfiltración	0,1-2,0	Pervaporación	9,0-11
Ultrafiltración	1,0-5,0	Destilación a membranas	5,6-8,0
Nanofiltración	5,0-20	Permeación de vapores	8,0-10
Osmosis inversa	10-100	Separación de gases	2-3

Fuente: ULBRICH, Mathias. *Advanced functional polymer membranes*. p. 45.

2.4. Tipos de membranas

Este capítulo se limitará a membranas sintéticas, excluyendo todas las estructuras biológicas, a pesar de esto el tema es todavía lo suficientemente grande como para incluir una amplia variedad de membranas que difieren en su composición química y física y en la forma en que operan.

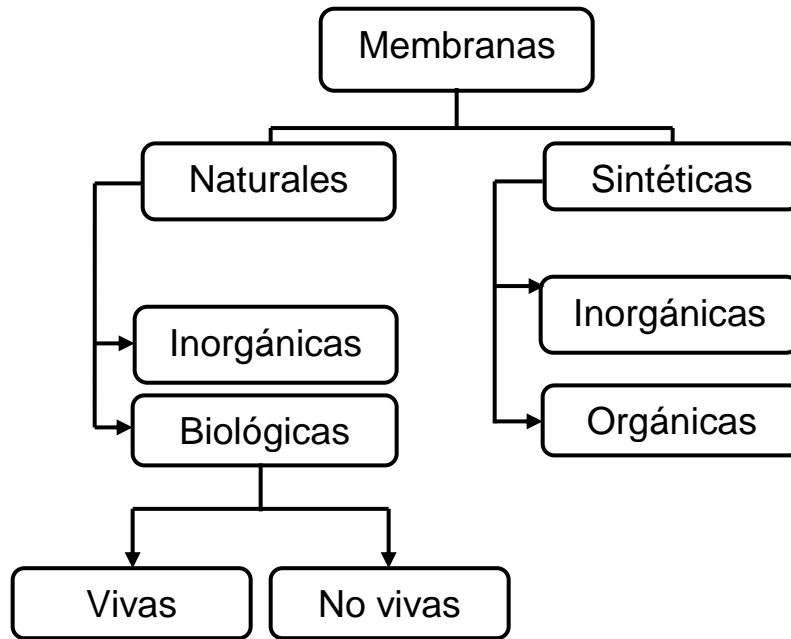
2.4.1. Membranas simétricas

A continuación se presenta una breve descripción de este tipo de membranas.

2.4.1.1. Membranas microporosas

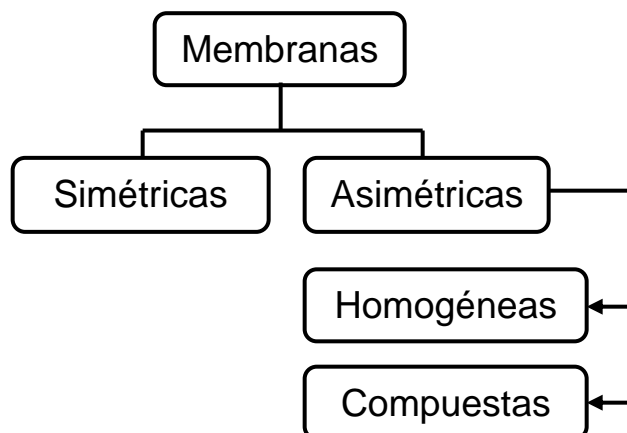
Son demasiado similares en estructura y función a las de filtración convencional. Tiene una estructura rígida, con alta distribución aleatoria, poros interconectados. Del orden de 0,1 a 10 micras de diámetro. Todas las partículas más grandes que los poros quedan completamente retenidos por la membrana.

Figura 2. **Clasificación de las membranas**



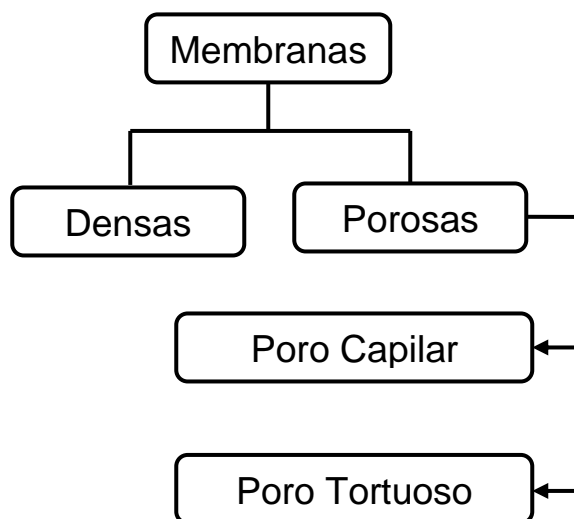
Fuente: MULDER, Marcel. *Technology and applications*. p. 51.

Figura 3. **Clasificación de las membranas por su morfología**



Fuente: MULDER, Marcel. *Technology and applications*. p. 53.

Figura 4. **Clasificación de las membranas por su estructura**



Fuente: MULDER, Marcel. *Technology and applications*. p. 55.

De acuerdo con la distribución de poros. Las partículas mucho más pequeñas que estos pasan a través de la membrana. Por lo tanto, la separación de solutos por membranas microporosas es principalmente una función del tamaño molecular y la distribución del tamaño de poro. En general, solo las moléculas que difieren considerablemente de tamaño se pueden separar de manera efectiva por este tipo de membranas.

2.4.1.2. Membranas densas no porosas

Consiste en una película densa a través del cual el permeado es transportado por difusión bajo la fuerza motriz de una presión, concentración, o gradiente de potencial eléctrico. La separación de los diversos componentes de una mezcla está relacionada directamente con su tasa de transporte relativo dentro de la membrana, que está determinada por su difusividad y solubilidad principalmente.

“En la mayoría de los casos cuando se separan gases, se utilizan membranas densas para llevar a cabo la dicha separación. Por lo general, estas membranas tienen una estructura asimétrica con la finalidad de mejorar el producto filtrado”.⁷

2.4.1.3. Membranas cargadas eléctricamente

Pueden ser densas o microporosas, pero son por lo general muy finas, en las paredes de los poros llevan iones con carga positiva o negativa. Una membrana con iones de carga positiva fija tiene la capacidad de intercambiar aniones transportados por un fluido, y viceversa.

La separación con membranas cargadas es accionada principalmente por la presencia de iones con diferente carga entre la membrana y el fluido. La separación se ve afectada por la carga y la concentración de los iones en la solución. Las membranas eléctricamente cargadas son utilizadas para la separación de electrolitos en electrodiálisis.

2.4.2. Membranas asimétricas

La tasa de transporte de una especie a través de una membrana es inversamente proporcional al espesor de la membrana. Las altas tasas de transporte son deseables en los procesos de separación. Por lo tanto, la membrana debe de ser lo más delgado posible.

⁷ BAKER, Richard W. *Membrane technology and applications*. p. 67.

Richard Baker publicó en el documento *Membrane technology and applications*; el desarrollo de técnicas de fabricación de membranas nuevas para producir estructuras de membrana asimétricas fue uno de los mayores avances de la tecnología de membranas durante los últimos 30 años. Las membranas asimétricas consisten en una capa superficial muy delgada soportada sobre una estructura porosa más gruesa.

2.4.2.1. Membranas líquidas, cerámicas y metálicas

Hasta ahora la discusión implica que los materiales que componen una membrana son polímeros orgánicos, de hecho, la gran mayoría de las membranas utilizadas comercialmente son a base de un polímero. Sin embargo, en los últimos años, las membranas de cerámica, son una clase especial de membranas microporosas, están siendo utilizados en aplicaciones de ultrafiltración y microfiltración dado que resisten las propiedades físico químicas de diferentes solventes y estabilidad térmica.

Las membranas metálicas densas, particularmente las de paladio, se están utilizando para la separación de hidrógeno a partir de mezclas gaseosas.

2.5. Métodos para la preparación de membranas poliméricas

Existen 3 métodos:

- Embadurnado
- Sinterización: este método se utilizó en la investigación
- Extrusión

2.5.1. Método de embadurnado

Este método consiste en preparar un estrato fino sobre un soporte metálico con un espesor determinado, el estrato debe estar completamente prensado, para luego ser trasladado a un horno donde se evapora el solvente o medio de dispersión en emulsión acuosa, la temperatura de operación debe ser ligeramente inferior al punto de fusión del polímero, dado que es necesario que el estrato fino se adhiera para formar el estrato de la membrana.

2.5.2. Método de sinterización

En este método se prepara la membrana a partir del polímero mediante el calentamiento de la capa previamente preparada y compactada. Se opera a una temperatura inferior al punto de fusión del polímero, hasta lograr que las partículas se adhieran y formen el poro del tamaño adecuado en función del tiempo y temperatura de operación en el horno, tienen aplicación muy reducida en materiales poliméricos no así en materiales cerámicos.

2.5.3. Método de extrusión

En este método se toma el polímero y se lleva a estado fluido mediante calentamiento de este, posteriormente se presiona para pasar de manera continua a través de una boquilla, que le da forma al producto, por efecto mecánico y calentamiento, el polímero se obliga a pasar por la boquilla donde adopta la forma deseada.

2.6. Tecnología de separación física con membrana

Este tipo de separación física la mayoría de veces tiene 2 ventajas hasta la fecha, comparado con otras técnicas de altos contenidos energéticos.

- Funciona perfectamente sin aditivos químicos
- Contenidos energéticos bajos para su funcionamiento

Este tipo de separación es muy característico a una gran diversidad de procesos. Toda esta clase de separaciones son similares por que en todas se utiliza una membrana.

El principio de funcionamiento es el siguiente: la membrana actúa como una barrera que deja pasar únicamente el solvente (permeado), reteniendo sólidos en suspensión y materia orgánica extraña. Existen distintas formas para permitir que un solvente se filtre por la membrana. Algunos ejemplos son: la aplicación de alta presión en cualquiera de los 2 lados, permitiendo la existencia de un diferencial de concentración y la aplicación de un campo eléctrico.

La membrana es simplemente una barrera que controla o selecciona las partículas que componen el permeado, de manera general es un obstáculo para impedir el paso de partículas extrañas al sistema de clasificación. Se puede utilizar como una alternativa para: sedimentar sólidos, clarificar solventes evitando el uso de filtros de carbón, también para extracción y destilación.

La elegancia de una membrana se evalúa en dos parámetros: selectividad (capacidad de permitir el paso de una especie y restringir el paso de otras), y permeabilidad (porcentaje de flujo permeado con respecto de la alimentación, productividad de la membrana).

El flujo es la medida de permeabilidad, el volumen de fluido por unidad de tiempo y de área de la membrana usa unidades del sistema internacional: $m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, se usa más comúnmente $l \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, puede usarse también flujo másico o molar.

2.6.1. Selectividad

Parámetros de selectividad

- Retención (R).

$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

R: retención de la membrana $0 \leq R \leq 100$

C_p : concentración del soluto en el permeado mol/l

C_f : concentración del soluto en la alimentación mol/l

2.6.2. Capacidad de retención

- Factor de separación ($\alpha_{A/B}$)

$$\alpha_{A/B} = \frac{Y_A/Y_B}{X_A/X_B} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

$Y_{A/B}$: concentraciones de las especies A y B en el permeado mol/l.

$X_{A/B}$: concentración de las especies A y B en la alimentación mol/l.

A: especie más permeable.

$\alpha_{A/B} = 1$ la membrana no es selectiva

$\alpha_{A/B} > 1$ selectividad de A sobre B.

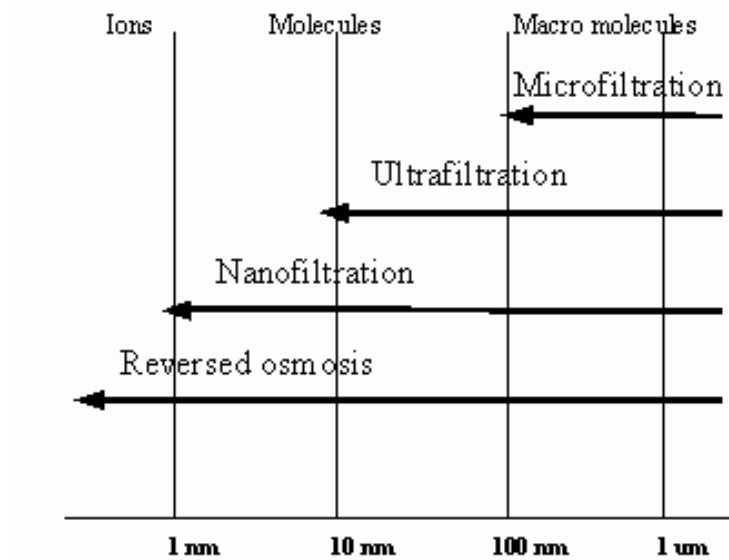
$\alpha_{A/B} \gg 1$ mayor selectividad de A sobre B, es apropiado para mezclas de gases o líquidos orgánicos.

“Otros procesos como nanofiltración y ósmosis inversa se utilizan para desalinizar el agua. En cuanto a estas dos clases de proceso los sistemas no funcionan dependiendo de la distribución de poros de la membrana, más bien la separación se da por difusión. La presión que se aplica en microfiltración y ultrafiltración es menor a la de nanofiltración y ósmosis inversa, pero la productividad es mucho más alta”.⁸

Mathias Ulbrich publicó en su documento que los procesos de separación como: ósmosis inversa, ultrafiltración, y la filtración convencional son procesos relacionados, que difieren principalmente en el diámetro promedio de poro de la membrana. Las membranas de ósmosis inversa son tan densas que no existen poros discretos, el transporte se produce a través de las áreas de volumen libre distribuido proporcionalmente. El tamaño de los diferentes solutos retenidos por cada clase de membrana se enseña en la figura 5.

⁸ BAKER, Richard W. *Membrane technology and applications*. p. 67.

Figura 5. **Caracterización de las distintas filtraciones por membranas**



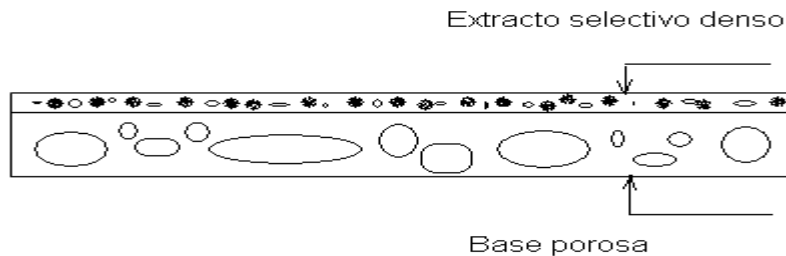
Fuente: Lenntech. *Tecnología de membrana*. p. 11.

Los cuatro tipos de separación física a membrana desarrollados industrialmente más comunes son: microfiltración, ultrafiltración, la ósmosis inversa, y electrodiálisis. Estos procesos están bien establecidos, y son utilizados por un gran número de empresas con experiencia.

2.7. Preparación de una membrana de microfiltración compuesta

Este tipo de membrana es compuesta, es decir que cuenta con doble capa, una base porosa compuesta por tereftalato de polietileno para incrementar el soporte de la barrera semipermeable, y encima de esta cuenta con un estrato selectivo denso también de tereftalato de polietileno, estrato donde se evalúa la distribución de poros, como se enseña en la figura 6.

Figura 6. **Detalle de la membrana compuesta preparada**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2008.

Para la preparación del extracto selectivo denso por el método de sinterización se preparó partiendo del polvo polimérico calentándolo ligeramente a una temperatura inferior a su punto de fusión, hasta lograr que las partículas se adhirieran.

La base porosa compuesta también de tereftalato de polietileno, el procedimiento para prepararlo fue el mismo a la del estrato denso, con la diferencia que este estrato conto con diferente porcentaje en peso es su estructura interna.

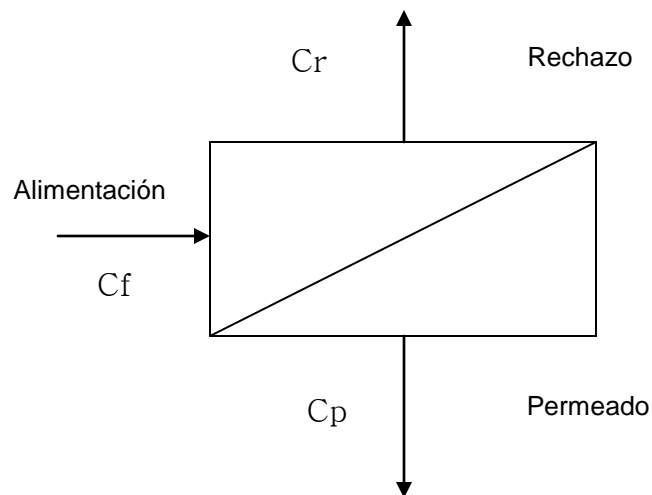
2.8. Tipos de flujo en una separación por membranas

Se caracteriza por la separación de la línea de alimentación en dos corrientes el permeado y el retentato (solución concentrada), como se enseña en la figura 7.

2.9. Química del tereftalato de polietileno

Este tipo de polímero comúnmente se abrevia por la palabra PET, es una sustancia orgánica termoplástica, perteneciente al grupo de elastómeros y se utiliza en fibras sintéticas; bebidas, alimentos y otros recipientes para líquido.

Figura 7. **Detalle de los flujos de alimentación y descarga en una separación por membranas**



Fuente: BAKER, Richard W. *Membrane technology and applications*. p. 61.

Dependiendo de su procesamiento, este polímero puede existir tanto como un amorfo y como un polímero semi cristalino. El material semicristalino puede parecer transparente u opaco y blanco en función de su estructura cristalina y tamaño de partícula. Su monómero puede ser sintetizado por la reacción de esterificación entre el ácido tereftálico y etilenglicol con agua como subproducto, o por reacción de transterificación entre etilenglicol y tereftalato de dimetilo con metanol como subproducto.

En la figura 8, se detalla el PET utilizado en las pruebas de investigación, la misma fue adquirida en Reciclados de Centro América Guatemala.

2.9.1. Propiedades físicas

Este tipo de polímero en su estado natural es una resina incolora, semi cristalino (estructura amorfa). Basado en cómo se procesa, el PET puede ser medio rígido o rígido.

Figura 8. **Tereftalato de polietileno con estructura interna amorfa**



Fuente: Reciclados de Centro América avenida Petapa Guatemala.

En general esta clase de polímero no cristaliza en un 100 % de su composición natural, también es el caso de las fibras de poliéster, aproximadamente el 60 % cristaliza y alrededor del 40 % de las estructuras alifáticas del polímero restantes son amorfos. Para formar un sólido amorfo es necesario enfriar de manera súbita el polímero fundido.

El estado de agregación de las moléculas a temperatura ambiente es sólido, teniendo las partículas posición fija, pero obtienen suficiente energía térmica al ponerlos por encima de T_g (temperatura de transición vítrea), en este punto de calentamiento el sólido empieza a fundirse, los cristales de nucleación empiecen a formarse de manera uniforme. Cuando se deja enfriar lentamente, el polímero fundido forma un material más cristalino.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables de operación

En la siguiente tabla se presenta el factor potencial de las variables de prueba, las más relevantes de esta investigación.

Tabla II. Cuadro de análisis de variables

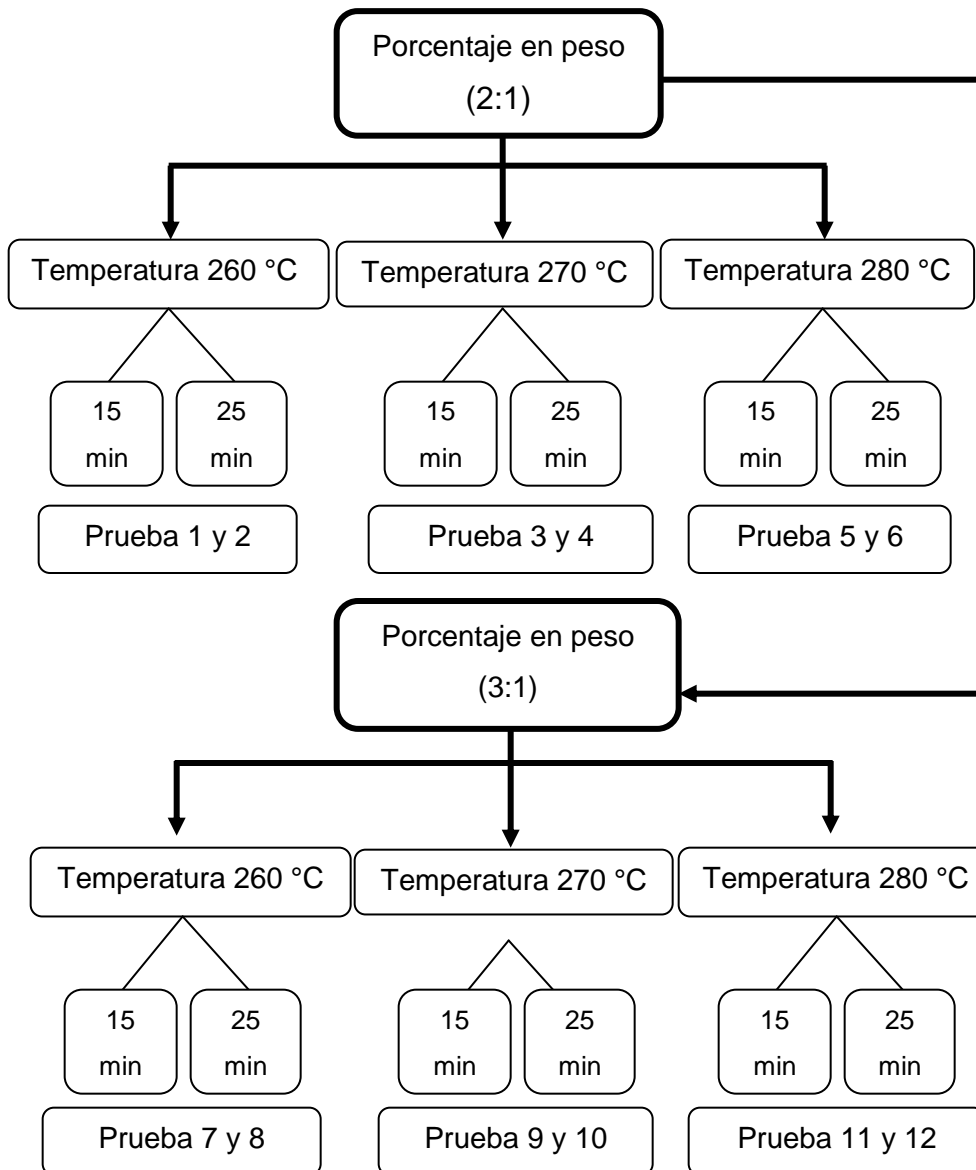
Factor potencial de la variable de estudio	Variable de operación		
Dependiente	Diámetro promedio de los poros (μm)		
Independiente	Temperatura de operación ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo de operación (min)	Porcentaje en peso (PET:NaCl)
Manipulable	Temperatura de operación ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo de operación (min)	Porcentaje en peso (PET:NaCl)
Observable	Diámetro promedio de los poros (μm)		
Cualitativa	Temperatura de operación ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo de operación (min)	
Cuantitativa	Porcentaje en peso (PET:NaCl)		

Fuente: elaboración propia.

3.1.1. Diseño experimental

Las variables de operación fueron monitoreadas de la siguiente manera

Figura 9. Diagrama de total de pruebas realizadas método de sinterización



Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

La delimitación de esta investigación se definió principalmente en preparar la membrana, sin realizar pruebas de laboratorio.

3.2.1. Planteamiento del problema

El problema de la investigación se plantea en función de la definición y delimitación del mismo.

3.2.1.1. Definición del problema

En el presente trabajo de graduación, se pretendió comprobar si es factible preparar una membrana polimérica para proceso de microfiltración, empelando el método de sinterización, para ello se analizaron 12 pruebas de las cuales se espera determinar las variables óptimas de trabajo, siendo las siguientes: temperatura, tiempo y porcentaje en peso.

3.2.1.2. Delimitación del problema

Para esta investigación se pretendió preparar una membrana de microfiltración utilizando únicamente técnicas visuales para poder caracterizarlas, dado que no se realizó pruebas experimentales que demuestren que las membranas obtenidas son aptas para realizar las funciones de una membrana de esta índole.

En conclusión el mayor alcance de la investigación, fue obtener la mejor combinación de las variables de preparación de un total de doce, siendo la 5 en su segunda corrida, con las siguientes variables y valores: temperatura 280 °C,

porcentaje en peso 2:1 y tiempo de preparación 15 min, con una densidad de 1,03 poros/mm², de 0 a 20 micras.

3.3. Recursos humanos disponibles

Investigador:

Robin Isael Fuentes González

Asesor:

M.A. Ing. Qco. Renato Giovanni Ponciano Sandoval

Asesor en la parte experimental del Laboratorio de Microbiología:

Ing. Pablo Morales Paniagua

3.4. Recursos y materiales disponibles (equipo, cristalería y reactivos)

Los recursos mínimos necesarios para la fase experimental fueron los siguientes:

3.4.1. Recursos materiales disponibles

Equipo

- Horno de doble cámara marca Oven
- Molino de martillos
- Molino de bolas
- Balanza analítica marca radwag
- Microscopio marca CETI con resolución en micras
- Cronómetro
- Cuchilla multiusos

- Bata de laboratorio
- Guantes térmicos

Cristalería

- Papel aluminio
- Mortero con pistilo
- Vaso de precipitación de 25 ml
- Recipiente metálico para compactar los estratos
- Micrómetro ocular con resolución en micras
- Micrómetro objetivo
- Portaobjeto

Reactivos y materia prima

- Cloruro de sodio refinado y seco
- Tereftalato de polietileno (PET)

Instalaciones y laboratorio de trabajo

- Sección de Tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Laboratorio de Microbiología de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.5. Técnica cualitativa y cuantitativa

La cantidad y diámetro promedio de los poros obtenidos en las distintas pruebas, fueron evaluados mediante técnicas cualitativas y cuantitativas.

3.5.1. Técnica cualitativa

Para la preparación de las membranas se utilizó el método de sinterización, las variables de operación fueron: temperatura, tiempo y porcentaje en peso. Se caracterizó visualmente cada membrana obtenida, mediante una distribución de poros, también se realizó un análisis Anova para comparar medias muestrales.

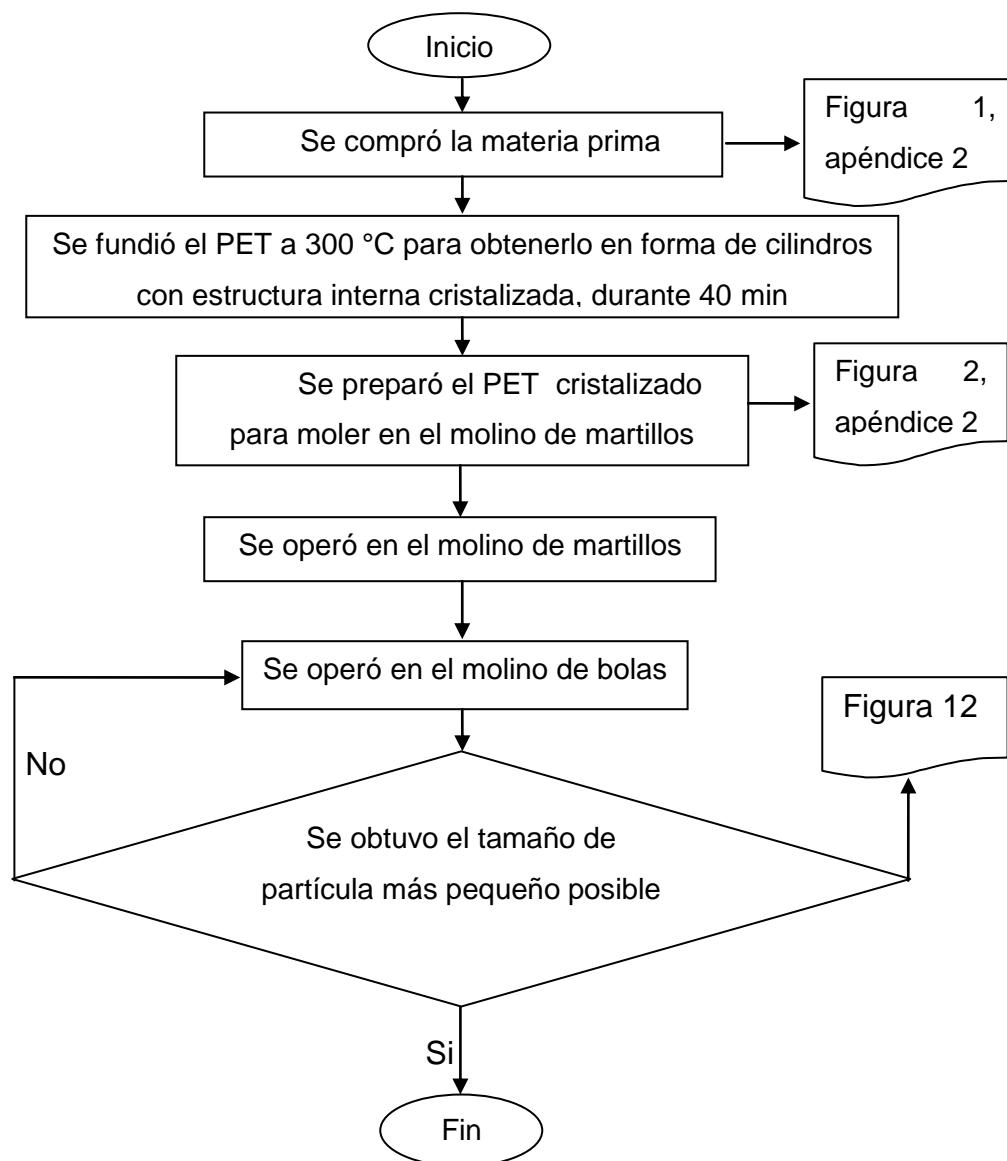
3.5.2. Técnica cuantitativa

Se cuantifico los efectos en los resultados al monitorear las variables de preparación, se obtuvo una densidad de poros para cada membrana, reportando de esta manera la cantidad de poros por unidad de área para cada una.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

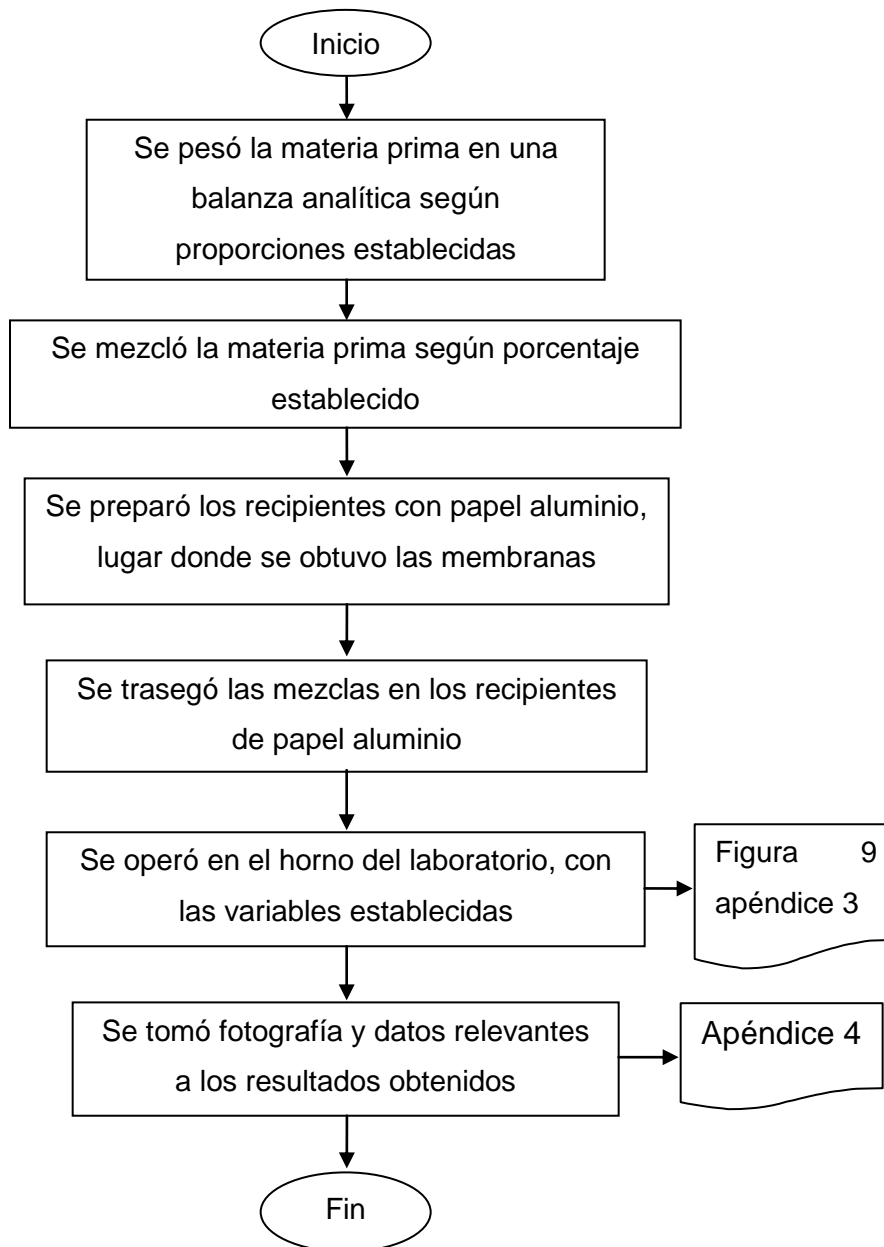
En los siguientes diagramas se representa el procedimiento para la obtención de resultados.

Figura 10. Diagrama de trabajos preliminares



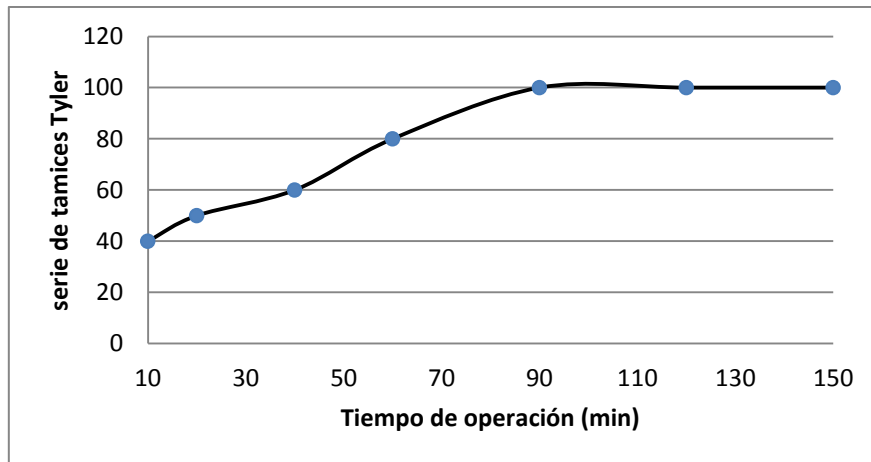
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Diagrama de trabajos preliminares



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Representación del tamaño de partícula en función del tiempo de operación en el molino de bolas**

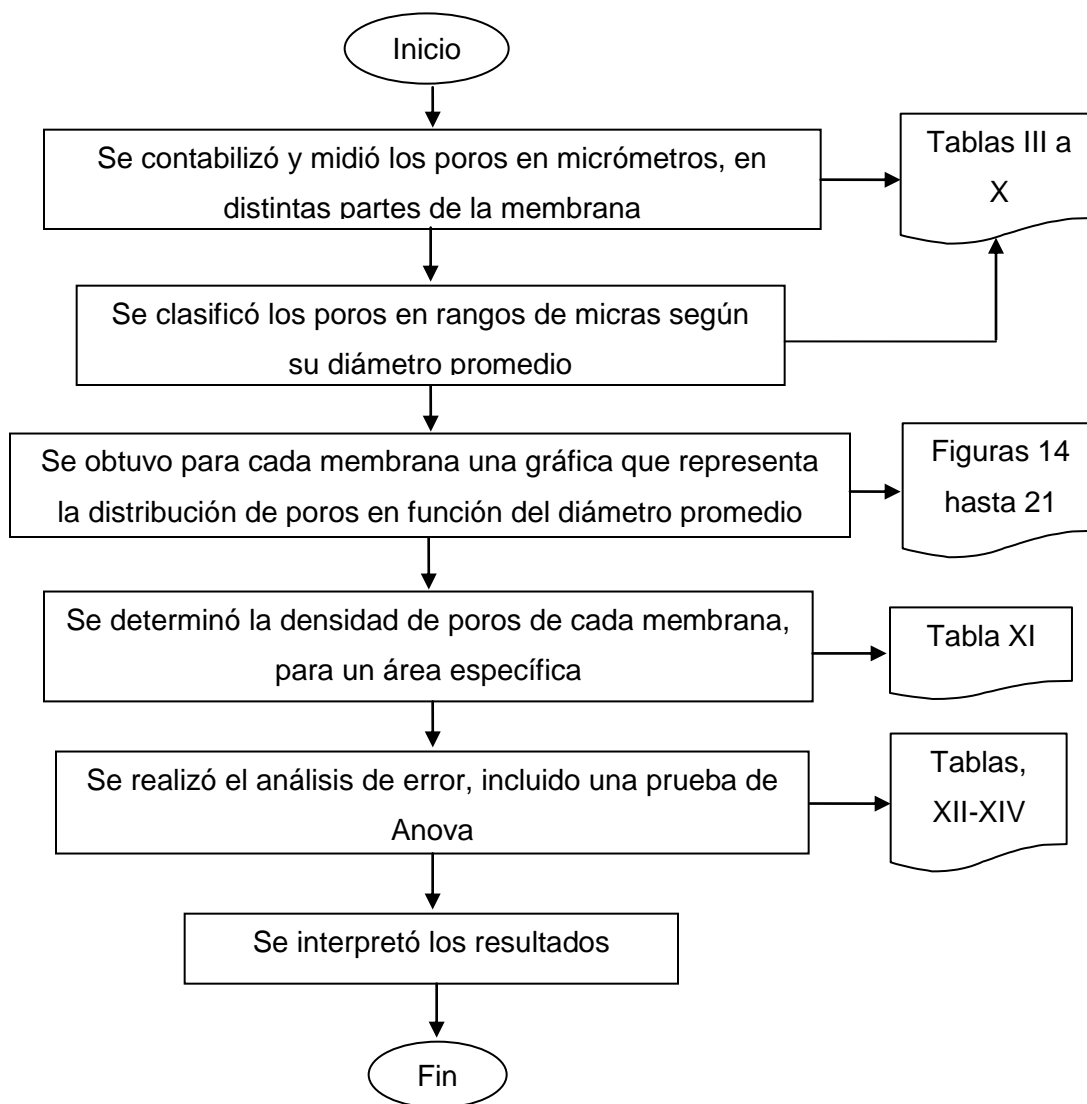


Fuente: Área de Tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Después de preparar las membranas se procedió a tubular la información obtenida, mediante el siguiente diagrama.

Figura 13. **Tabulación de la información**



Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Los resultados obtenidos expuestos en base a datos estadísticos, principalmente donde estos fueron similares.

3.8.1. Tratamiento estadístico de datos

La dispersión de datos fueron evaluados mediante una desviación estándar de la siguiente forma:

3.8.1.1. Cálculos estadísticos

- Cálculo de la media de una población

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

\bar{x} : media de la distribución

X_i : valor de la repetición i

n : número observaciones X_i

- Cálculo de la desviación estándar

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

S : desviación estándar

\bar{x} : media de la distribución

n : número de observaciones X_i

3.8.1.2. Análisis Anova multivariable

“Dos o más muestras serán iguales si la varianza de sus medias muestrales es igual que la varianza total de los datos de las 2 pruebas en conjunto”.⁹

- Cálculo de la gran media

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\sum_i^k \bar{x}_i}{k} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

$\bar{\bar{x}}$: gran media: media de medias muestrales

\bar{x}_i : media del conjunto i

K : número de poblaciones

- Cálculo de varianza entre medias muestrales

$$\beta^2 = \frac{\sum_i^k n_i (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2}{k-1} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

β : varianza entre medias muestrales

n_i : número de observaciones de la población i

⁹ TORRE TORRES, Oscar Valdemar. *Estadística inferencial paramétrica, no paramétrica y multivariante*. p. 151.

- Cálculo de la varianza total de los datos de las muestras en conjunto

$$\xi^2 = \sum_i^k \left(\frac{n_i - 1}{nt - k} \right) s_i^2 \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

ξ : varianza total de los datos de las muestras en conjunto

nt : total de observaciones de todas las poblaciones

s_i^2 : desviación estándar de la población i

- Cálculo de estadístico F

$$F = \frac{\beta^2}{\xi^2}$$

Las nociones generales intuitivas para emplear el estadístico F son:

a) “Si el estadístico F tiene un valor cercano a 1, se llega a la observación de que las medias entre muestras son iguales debido a que la varianza entre muestras y la varianza entre todos los datos de las muestras son iguales.

b) Si el estadístico F es muy grande, se observa que la diferencia o varianza entre medias muestrales es muy grande en proporción a la varianza de todos los datos de las muestras en conjunto. Por lo tanto, se concluye que las poblaciones no son iguales”.¹⁰

¹⁰ TORRE TORRES, Oscar Valdemar. *Estadística inferencial paramétrica, no paramétrica y multivariante*. p. 151.

“El valor crítico para determinar si F es muy grande, está determinado con un nivel de significancia de $\alpha = 5 \%$ con dos colas que equivale a un valor de 4,27934, resumiendo de esta manera, todo valor de F menor a 4,27934 determina que la varianza de las poblaciones son iguales, si F es igual o mayor a 4,27934 la conclusión es contraria”.¹¹

Existen dos clases de hipótesis para confirmar las nociones intuitivas clasificadas como:

1. Hipótesis nula: H_0 : la distribución de poros de ambas pruebas son iguales $\bar{X} = \bar{X}$.
2. Hipótesis alterna: H_a : la distribución de poros de ambas pruebas no son iguales $\bar{X} \neq \bar{X}$.

¹¹ TORRE TORRES, Oscar Valdemar. *Estadística inferencial paramétrica, no paramétrica y multivariante*. p. 151.

4. RESULTADOS

A continuación se presenta el conteo y diámetro promedio de los poros obtenidos de las distintas pruebas realizadas.

Tabla III. **Distribución de poros prueba 5, primera corrida**

Total de poros 523	0-20 μm	20-40 μm	40- 60 μm	60-80 μm	80-100 μm	100-120 μm	120-140 μm	140-160 μm
Fotografía 1	19	12	5	7	4	1	1	0
Fotografía 2	2	13	26	12	4	5	3	1
Fotografía 3	0	8	11	9	3	0	1	4
Fotografía 4	5	7	4	6	6	4	0	0
Fotografía 5	9	7	11	11	4	3	2	1
Fotografía 6	14	15	13	5	5	3	3	0
Fotografía 7	5	19	8	8	4	3	3	3
Fotografía 8	16	14	7	9	4	4	0	0
Fotografía 9	17	14	7	6	10	5	4	4
Fotografía 10	18	13	11	7	8	6	0	0
Total parcial	105	122	103	80	52	34	14	13
Porcentaje (%)	20,0	23,3	19,7	15,3	9,94	6,50	2,68	2,49

Fuente: apéndice 6, Laboratorio de Microbiología, Facultad de Ingeniería, Usac.

Tabla IV. **Distribución de poros prueba 5, segunda corrida**

Total de poros 772	0-20 µm	20-40 µm	40- 60 µm	60-80 µm	80- 100 µm	100- 120 µm	120- 140 µm	140- 160 µm
Fotografía 1	22	11	17	14	6	3	6	1
Fotografía 2	27	20	14	12	9	7	3	1
Fotografía 3	9	14	9	15	9	6	3	1
Fotografía 4	10	30	18	10	4	3	2	1
Fotografía 5	4	3	15	13	10	9	4	0
Fotografía 6	23	14	17	13	10	7	3	0
Fotografía 7	15	20	15	7	7	3	5	4
Fotografía 8	17	12	14	9	6	4	0	0
Fotografía 9	8	9	10	6	10	3	0	0
Fotografía 10	29	29	26	16	11	4	7	8
Total parcial	164	162	155	111	82	49	33	16
Porcentaje (%)	21,2	21,1	20,1	14,4	10,6	6,35	4,27	2,07

Fuente: apéndice 6, Laboratorio de Microbiología, Facultad de Ingeniería, Usac.

Tabla V. **Distribución de poros prueba 6, primera corrida**

Total de poros 700	0-20 µm	20-40 µm	40- 60 µm	60-80 µm	80- 100 µm	100- 120 µm	120- 140 µm	140- 160 µm
Fotografía 1	5	12	17	8	2	1	0	2
Fotografía 2	3	15	8	3	3	0	2	4
Fotografía 3	16	26	14	7	8	5	7	1
Fotografía 4	6	18	17	8	7	5	2	3
Fotografía 5	4	20	20	25	7	3	0	1
Fotografía 6	24	27	9	13	7	2	3	0
Fotografía 7	17	24	14	10	13	14	8	4
Fotografía 8	1	15	6	6	6	5	0	0
Fotografía 9	14	36	17	14	7	7	4	1
Fotografía 10	0	6	19	9	8	7	8	3
Total parcial	90	199	141	103	68	49	31	19
Porcentaje (%)	12,9	28,4	20,1	14,7	9,70	7,00	4,43	2,71

Fuente: apéndice 6, Laboratorio de Microbiología, Facultad de Ingeniería, Usac.

Tabla VI. **Distribución de poros prueba 6, segunda corrida**

Total de poros 871	0-20 µm	20-40 µm	40- 60 µm	60-80 µm	80- 100 µm	100- 120 µm	120- 140 µm	140- 160 µm
Fotografía 1	11	40	27	17	14	12	18	9
Fotografía 2	9	21	26	16	12	11	3	3
Fotografía 3	8	15	16	12	7	6	2	1
Fotografía 4	17	26	22	12	14	10	6	3
Fotografía 5	7	10	21	12	7	3	2	0
Fotografía 6	13	10	18	13	10	10	4	3
Fotografía 7	8	15	20	8	8	8	3	3
Fotografía 8	8	10	17	6	6	4	3	1
Fotografía 9	5	22	26	12	8	9	3	3
Fotografía 10	4	9	27	9	9	14	6	4
Total parcial	90	178	220	117	99	87	50	30
Porcentaje (%)	10,3	20,4	25,3	13,4	11,4	9,98	5,74	3,44

Fuente: apéndice 6, Laboratorio de Microbiología, Facultad de Ingeniería, Usac.

Tabla VII. **Distribución de poros prueba 11, primera corrida**

Total de poros 502	0-20 µm	20-40 µm	40- 60 µm	60-80 µm	80- 100 µm	100- 120 µm	120- 140 µm	140- 160 µm
Fotografía 1	8	15	19	14	11	10	6	4
Fotografía 2	5	9	13	12	10	8	3	2
Fotografía 3	4	7	15	10	9	3	3	1
Fotografía 4	8	11	18	15	13	8	3	1
Fotografía 5	3	5	13	10	9	5	1	2
Fotografía 6	4	7	5	3	4	3	1	0
Fotografía 7	1	3	7	5	3	5	3	1
Fotografía 8	3	4	6	15	4	7	2	2
Fotografía 9	0	1	11	7	5	0	1	3
Fotografía 10	8	3	14	9	8	3	3	2
Total parcial	44	65	121	100	76	52	26	18
Porcentaje (%)	8,75	13,0	24,1	19,9	15,1	10,4	5,18	3,59

Fuente: apéndice 6, Laboratorio de Microbiología, Facultad de Ingeniería, Usac.

Tabla VIII. **Distribución de poros prueba 11, segunda corrida**

Total de poros 570	0-20 µm	20-40 µm	40- 60 µm	60-80 µm	80- 100 µm	100- 120 µm	120- 140 µm	140- 160 µm
Fotografía 1	8	15	10	7	6	7	3	2
Fotografía 2	2	5	15	13	7	3	0	2
Fotografía 3	3	7	21	14	8	1	0	0
Fotografía 4	2	3	27	18	6	3	0	1
Fotografía 5	3	3	19	19	10	8	1	1
Fotografía 6	0	0	15	6	7	3	3	2
Fotografía 7	1	2	3	9	13	10	0	3
Fotografía 8	9	14	10	12	11	8	10	8
Fotografía 9	1	12	10	12	6	6	4	3
Fotografía 10	5	9	22	17	6	7	7	2
Total parcial	34	70	152	127	80	56	28	23
Porcentaje (%)	5,96	12,3	26,7	22,3	14,0	9,82	4,91	4,03

Fuente: apéndice 6, Laboratorio de Microbiología, Facultad de Ingeniería, Usac.

Tabla IX. **Distribución de poros prueba 12, primera corrida**

Total de poros 619	0-20 µm	20-40 µm	40- 60 µm	60-80 µm	80- 100 µm	100- 120 µm	120- 140 µm	140- 160 µm
Fotografía 1	2	5	18	14	10	4	3	4
Fotografía 2	2	7	19	12	7	7	5	2
Fotografía 3	0	0	6	5	12	7	5	3
Fotografía 4	3	4	18	10	14	5	5	4
Fotografía 5	3	4	17	6	13	5	3	1
Fotografía 6	7	7	14	11	6	2	3	0
Fotografía 7	2	4	13	17	19	12	12	3
Fotografía 8	8	7	10	11	15	7	8	4
Fotografía 9	11	8	21	23	10	9	5	3
Fotografía 10	3	5	8	12	12	8	4	1
Total parcial	41	51	144	121	118	66	53	25
Porcentaje (%)	6,62	8,24	23,3	19,5	19,1	10,7	8,56	4,04

Fuente: apéndice 6, Laboratorio de Microbiología, Facultad de Ingeniería, Usac.

Tabla X. **Distribución de poros prueba 12, segunda corrida**

Total de poros 781	0-20 µm	20-40 µm	40- 60 µm	60-80 µm	80- 100 µm	100- 120 µm	120- 140 µm	140- 160 µm
Fotografía 1	5	8	23	15	9	5	4	0
Fotografía 2	15	13	24	8	6	3	0	2
Fotografía 3	9	11	20	15	9	8	6	2
Fotografía 4	15	16	25	10	10	7	5	2
Fotografía 5	13	12	21	12	13	7	11	4
Fotografía 6	3	8	16	10	4	3	2	2
Fotografía 7	7	9	28	20	12	10	5	2
Fotografía 8	9	11	18	13	7	3	1	2
Fotografía 9	15	20	27	17	11	9	4	1
Fotografía 10	3	7	24	11	10	7	5	2
Total parcial	94	115	226	131	91	62	43	19
Porcentaje (%)	12,0	14,7	28,9	16,8	11,7	7,9	5,50	2,43

Fuente: apéndice 6, Laboratorio de Microbiología, Facultad de Ingeniería, Usac.

Tabla XI. **Densidad de poros para las distintas pruebas**

Núm. de prueba	Área contabilizada (mm²) aproximado	Poros totales	Densidad de poros (poros/mm²)
5 primera corrida	160	523	3,27
5 segunda corrida	160	772	4,82
6 primera corrida	160	700	4,37
6 segunda corrida	160	871	5,44
11 primera corrida	160	502	3,13
11 segunda corrida	160	570	3,56
12 primera corrida	160	619	3,86
12 segunda corrida	160	781	4,88

Fuente: resultados obtenidos, tablas III a X.

Tabla XII. **Rango en micrómetros donde se obtuvo la mayoría de poros y desviación estándar**

Núm. de prueba	Diámetro Promedio (μm)	Cantidad de poros	Desviación estándar
5	20-40	122	11,24
5'	0-20	164	
6	20-40	199	8,23
6'	40-60	220	
11	40-60	121	3,64
11'	40-60	152	
12	40-60	144	7,83
12'	40-60	226	

Fuente: resultados obtenidos, tablas III a X.

Tabla XIII. **Prueba Anova para analizar la dispersión de datos de un par de pruebas con diferente tiempo de operación**

Núm. de prueba	Núm. de corrida	Temperatura de operación ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo comparado (min)	Porcentaje en peso	Estadístico (F)	Valor crítico de (F) 4,27934	Conclusión Varianza similar o diferente
5 y 6	Primera	280	15-25	2:1	26,35	Mayor que F	Diferente
5 y 6	Segunda	280	15-25	2:1	7,442	Mayor que F	Diferente
11 y 12	Primera	280	15-25	3:1	15,46	Mayor que F	Diferente
11 y 12	Segunda	280	15-25	3:1	35,56	Mayor que F	Diferente

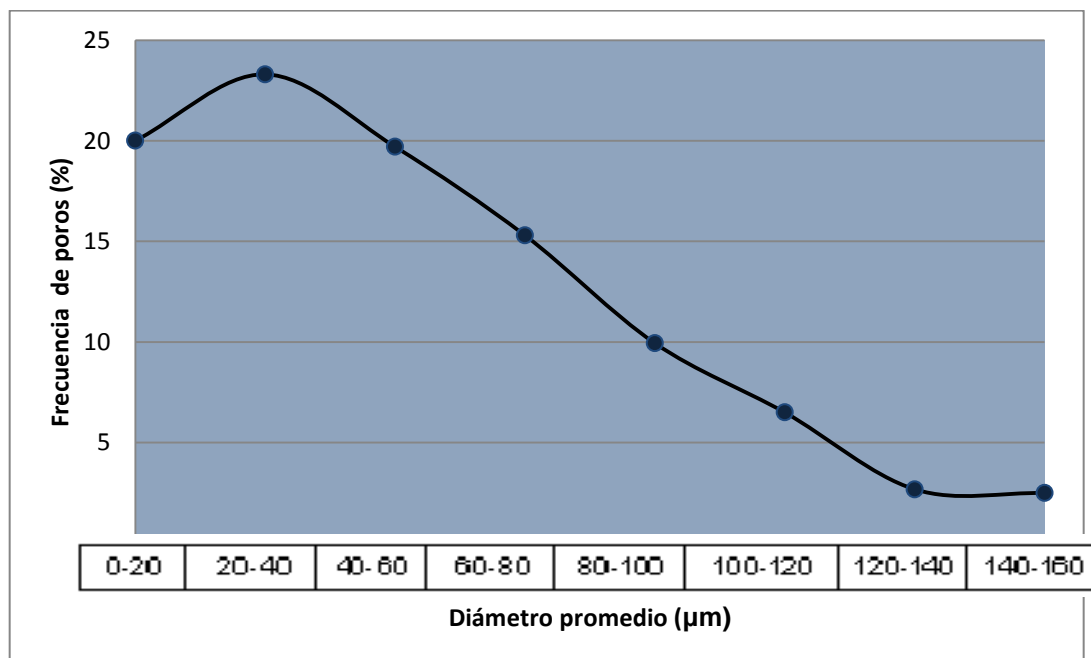
Fuente: resultados obtenidos, tablas de III a X.

Tabla XIV. Prueba Anova para analizar la dispersión de datos de un par de pruebas con diferente porcentaje en peso

Núm. de prueba	Núm. de corrida	Temperatura de operación (°C)	Tiempo de operación (min)	Porcentaje en peso comparado	Estadístico (F)	Valor crítico de (F) 4,27934	Conclusión Varianza igual o diferente
5 y 6	Primera	280	15	2:1-3:1	0,555	Menor que F	Igual
5 y 6	Segunda	280	15	2:1-3:1	36,95	Mayor que F	Diferente
11 y 12	Primera	280	25	2:1-3:1	6,349	Mayor que F	Diferente
11 y 12	Segunda	280	25	2:1-3:1	60,42	Mayor que F	Diferente

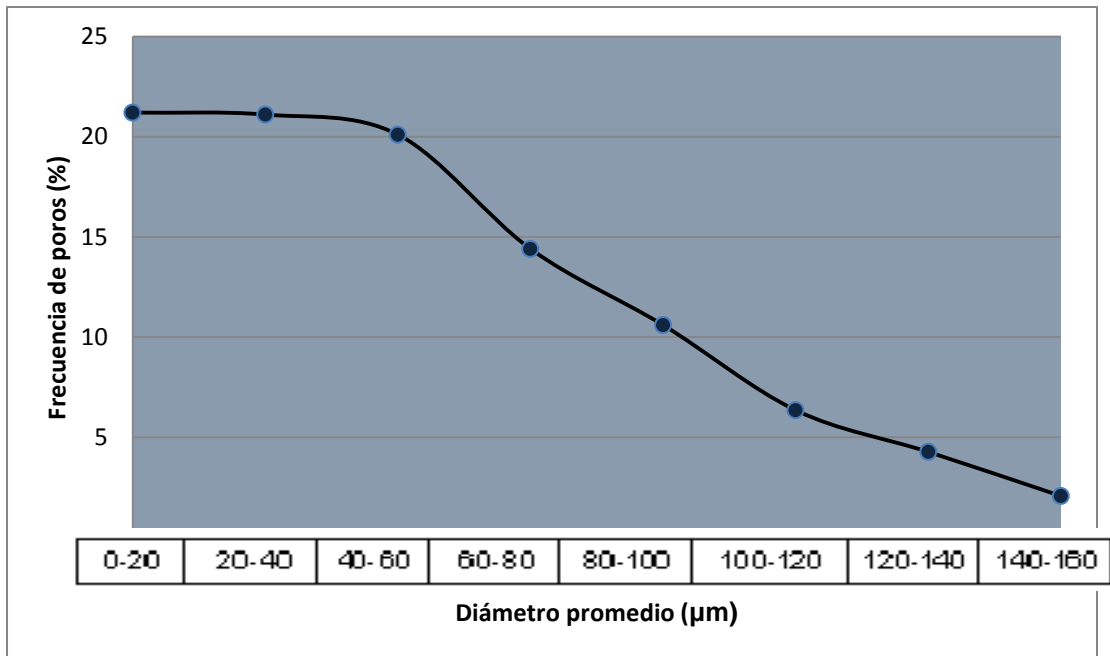
Fuente: resultados obtenidos, tablas de III a X.

Figura 14. Distribución de poros en función del diámetro promedio para la prueba 5, primera corrida



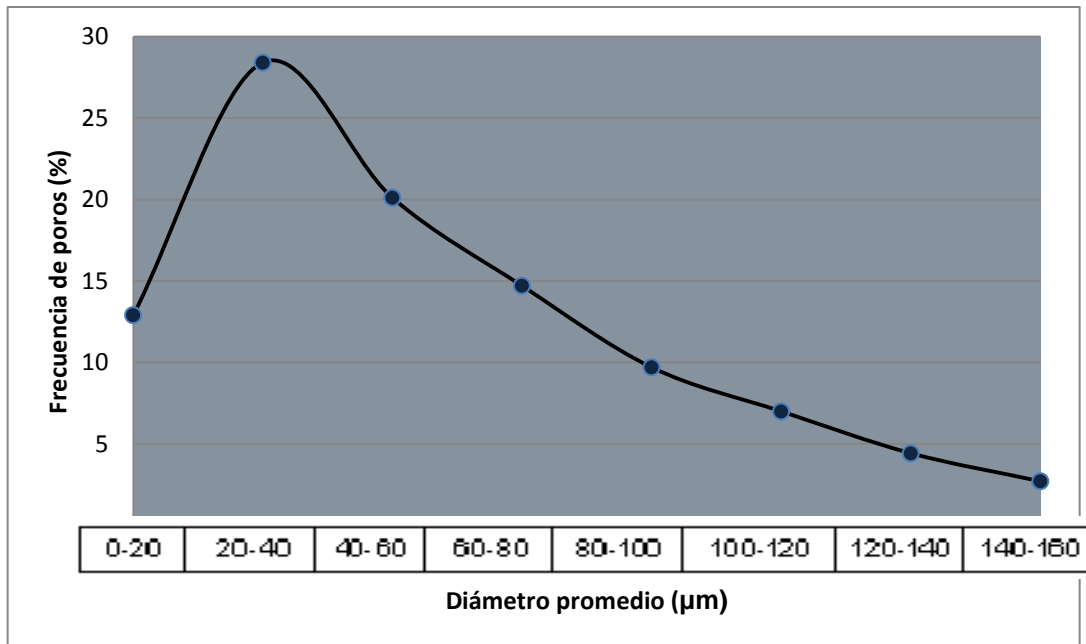
Fuente: tabla III, sección de resultados.

Figura 15. **Distribución de poros en función del diámetro promedio para la prueba 5, segunda corrida**



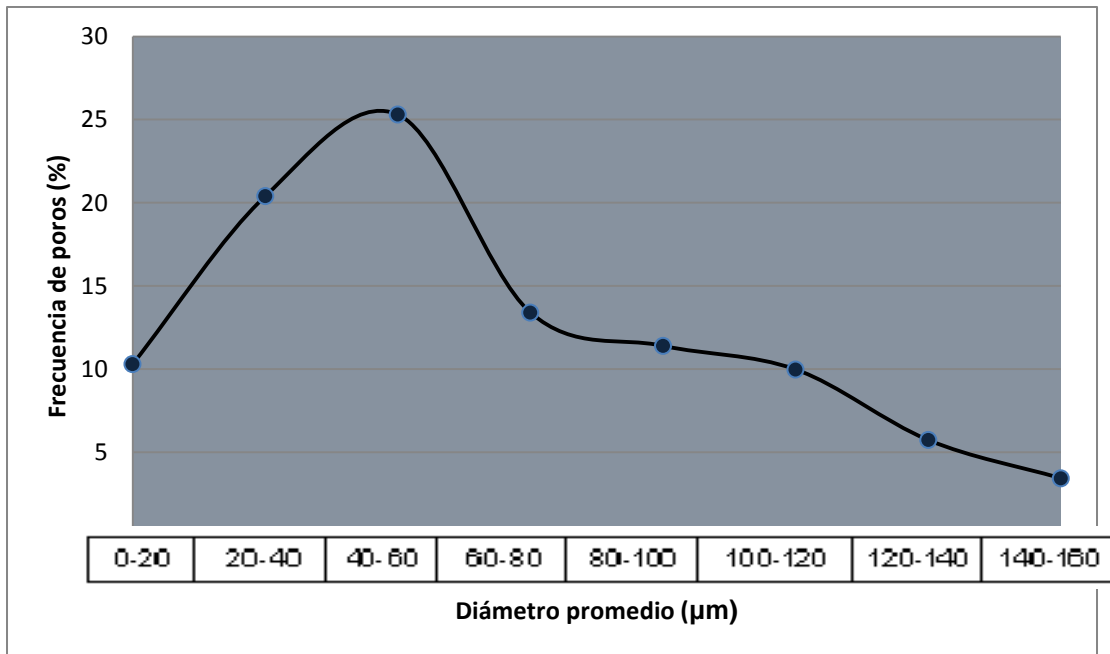
Fuente: tabla IV, sección de resultados.

Figura 16. **Distribución de poros en función del diámetro promedio para la prueba 6, primera corrida**



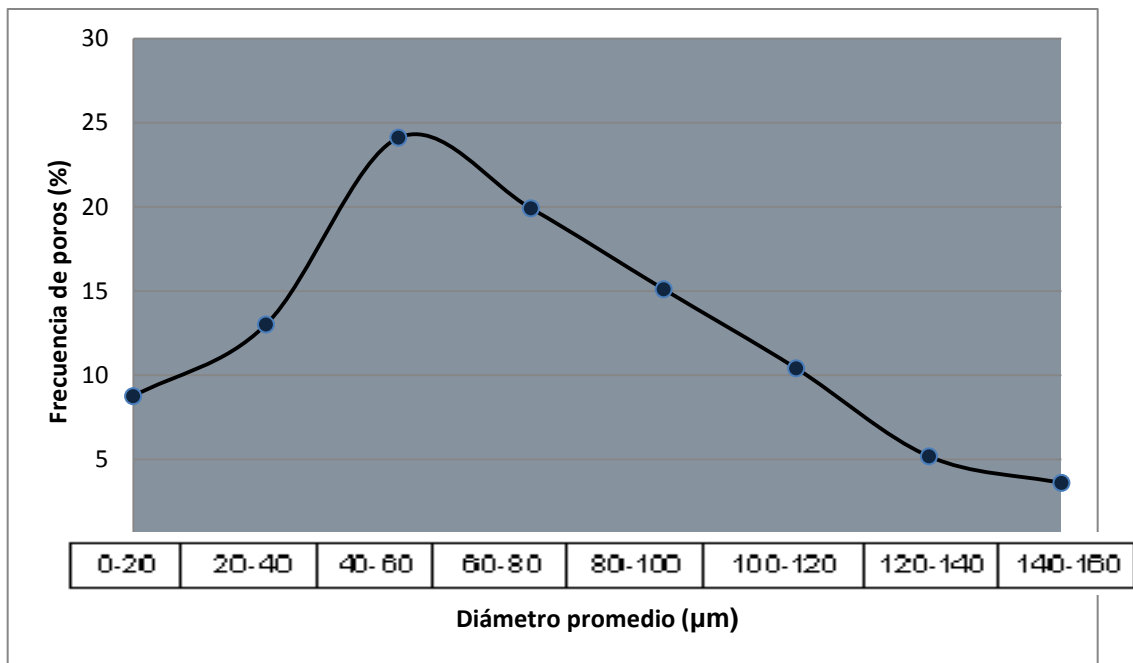
Fuente: tabla V, sección de resultados.

Figura 17. **Distribución de poros en función del diámetro promedio para la prueba 6, segunda corrida**



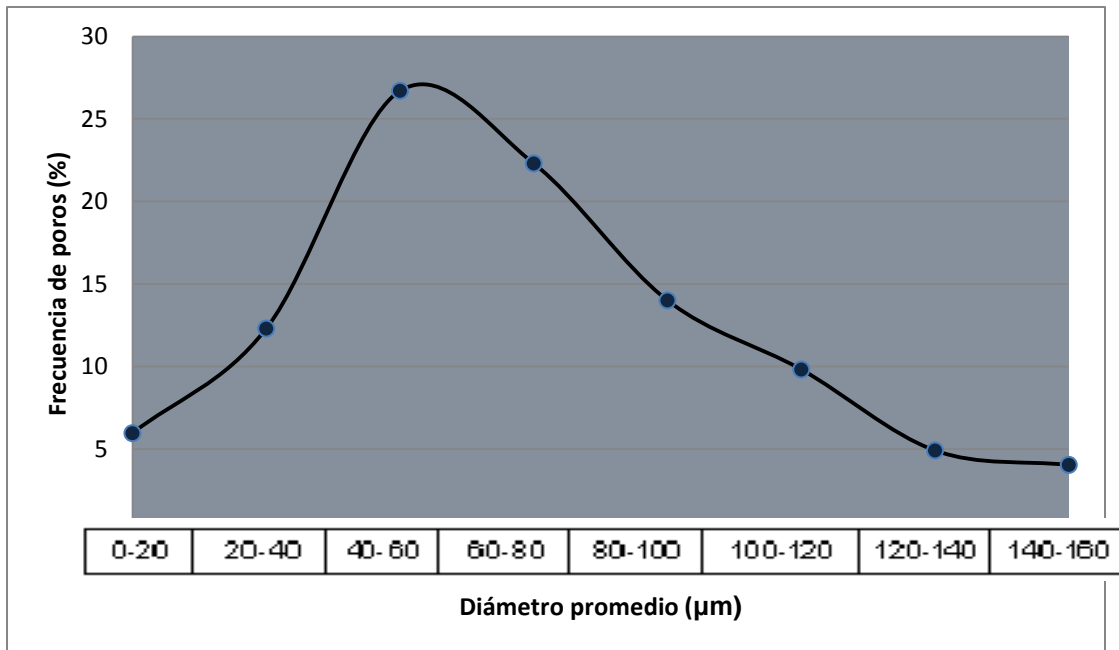
Fuente: tabla VI, sección de resultados.

Figura 18. **Distribución de poros en función del diámetro promedio para la prueba 11, primera corrida**



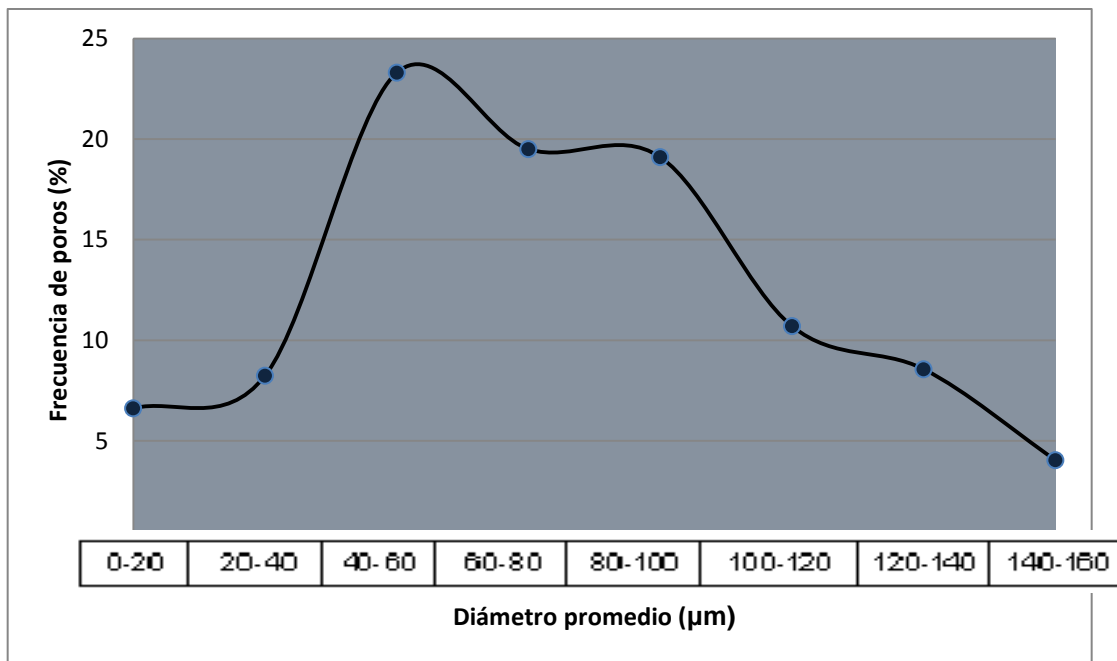
Fuente: tabla VII, sección de resultados.

Figura 19. **Distribución de poros en función del diámetro promedio para la prueba 11, segunda corrida**



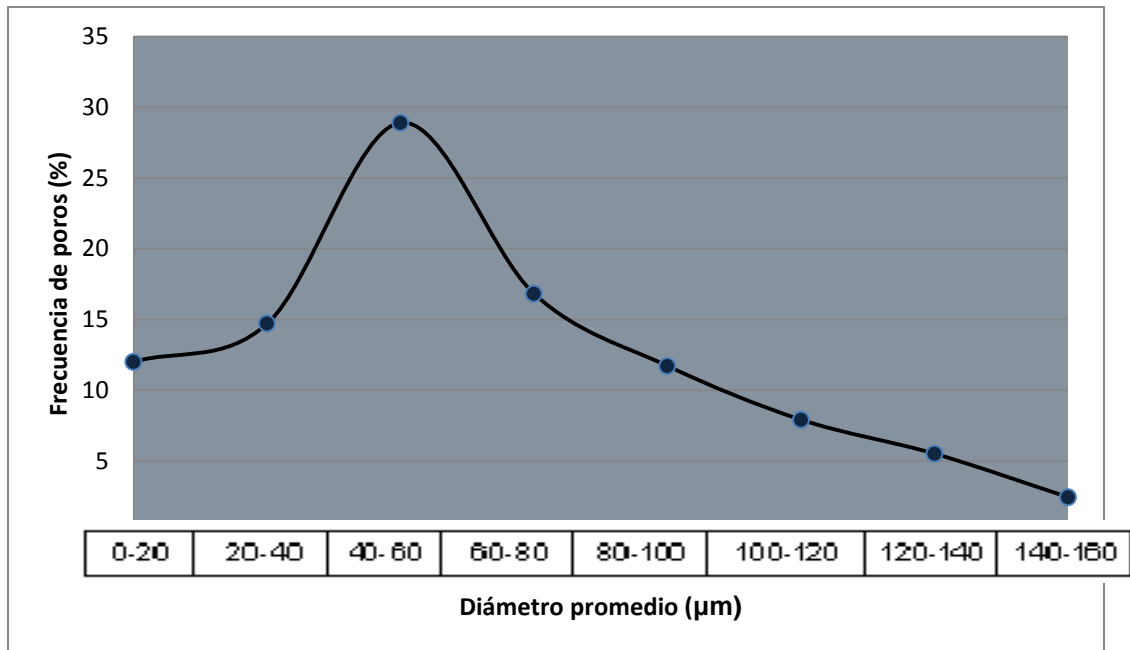
Fuente: tabla VIII, sección de resultados.

Figura 20. **Distribución de poros en función del diámetro promedio para la prueba 12, primera corrida**



Fuente: tabla IX, sección de resultados.

Figura 21. **Distribución de poros en función del diámetro promedio para la prueba 12, segunda corrida**



Fuente: tabla X, sección de resultados.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente proyecto de investigación, se pretendió preparar y caracterizar una membrana compuesta para procesos de microfiltración, empleando el método de sinterización, determinado las variables experimentales siendo las siguientes: temperatura, tiempo y porcentaje en peso.

Las muestras analizadas contaron con dos capas: una base porosa y un estrato selectivo denso, para la base porosa se trabajó con un porcentaje en peso de 2:1, PET:NaCl, (25:12,5 gramos), mientras que para el estrato selectivo denso se trabajó con dos porcentajes en peso 2:1 y 3:1, PET:NaCl, (10:5 y 15:5 gramos).

La base porosa de la membrana para todas las pruebas contó con el mismo porcentaje en peso: 2:1, los poros formados en este estrato no fueron medidos ni contabilizados, dado que tuvieron la función de incrementar la resistencia de la membrana, los poros obtenidos en esta capa tuvieron diámetro promedio mayor a los del estrato selectivo denso.

En la tabla XI, se presenta la densidad de poros para cada membrana, resultado de dividir el total de poros contabilizados en 160 mm², dado que se analizaron 10 muestras de 16 mm² aproximadamente cada una.

En la tabla XII, se reportan los rangos en micrómetros donde se obtuvo la mayor cantidad de poros, también su respectiva desviación estándar, “índice numérico que representa la dispersión de los diámetros respecto al diámetro promedio”,¹² con los siguientes resultados: 11,24 8,23 3,64 y 7,83, para las pruebas 5, 6, 11 y 12 respectivamente, dado que estos valores son mayores que cero, se concluye que los poros obtenidos cuentan con diámetro promedio disperso.

De las tres variables experimentales la más relevante o importante fue la temperatura, debido a que la membrana se obtiene, precisamente en el punto de fusión del polímero, para esta investigación se trabajó con tres: 260, 270 y 280 °C. “El punto de fusión del tereftalato de polietileno es 260 °C”,¹³ en el laboratorio fundió a 280 °C. Esta variación pudo ser por la presencia de cristales de cloruro de sodio.

Debido a que en las tablas III hasta X y figuras 14 hasta 21, no se obtuvo una tendencia clara o suficiente, para explicar el efecto en los resultados de las otras dos variables experimentales, por esta razón se realizó un análisis Anova, para comparar y discutir con base en este método estadístico. “Anova es una prueba muy poderosa y muy simple de interpretar. Este método sirve para comparar dos medias, que pueden ser independientes o estar acopladas, apareadas o relacionadas y que pueden venir de tamaños de muestras totalmente diferentes”.

¹⁴

¹² WALPOLE, Ronald E. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. p. 125.

¹³ *Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales*.

http://www.eis.uva.es/~macromol/curso0506/pet/propiedades_y_caracteristicas.htm. Consulta: 17 de mayo de 2015.

¹⁴ TORRE TORRES, Oscar Valdemar. *Estadística inferencial paramétrica, no paramétrica y multivariante*. p. 158.

Utiliza la siguiente noción intuitiva: “Dos o más muestras serán iguales si la varianza de sus medias es igual que la varianza total de los datos de las muestras en conjunto”.¹⁵

Para afirmar esta noción intuitiva de manera estadística numérica, utiliza es estadístico F con las siguientes nociones generales:

- a). Si el estadístico F tiene un valor cercano a 1, se llega a la observación de que las medias entre muestras son iguales debido a que la varianza entre muestras y la varianza entre todos los datos de las muestras son iguales.
- b). Si el estadístico F es muy grande, se observa que la diferencia o varianza entre medias muestrales es muy grande en proporción a la varianza de todos los datos de las muestras en conjunto. Por lo tanto, se concluye que las poblaciones no son iguales.

Es importante aclarar una interrogante, ¿qué valor debe tener F para concluir que es grande?, la respuesta se logra empleando una función de probabilidad F de Fisher. Se utilizó tablas de valores F que se encuentran en la plataforma Moodle en el tema correspondiente a la prueba Anova. Con los grados de libertad evaluados y con un nivel de significancia de $\alpha = 5 \%$, se obtuvo un valor crítico de: 4,28. Resumiendo de esta manera si F es menor a 4,28 la varianza de los diámetros promedios de los poros, de ambas poblaciones son iguales, si F es igual o mayor a 4,28 la conclusión es contraria.

¹⁵ TORRE TORRES, Oscar Valdemar. *Estadística inferencial paramétrica, no paramétrica y multivariante*. p. 161.

En la tabla XIII, se comparó pruebas trabajando a diferentes tiempos, manteniendo la variable de porcentaje en peso fijo, dado que el estadístico F en todas las comparaciones fue mayor al valor crítico, se concluye que operando a diferente tiempo se obtiene diferente distribución de poros, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alterna, para mejor comprensión revisar la sección de análisis de error, (sección de análisis estadístico, numeral 6).

En la tabla XIV, se comparó pruebas trabajando a diferente porcentaje en peso, manteniendo la variable de tiempo fijo, dado que el estadístico F en la primera comparación es menor al valor crítico, se concluye que la distribución de poros para las pruebas 5 y 6 en su primera corrida es la misma, no así para el resto de comparaciones.

Resumiendo acorde a los resultados obtenidos es preferible trabajar con porcentaje en peso 2:1 y tiempo de 15 minutos, dado que con estos valores se obtienen poros con diámetro promedio menor, que al trabajar con razón de masa 3:1 y 25 minutos de preparación.

Definiendo el problema de manera general la mejor combinación de las variables de operación fueron las siguientes: temperatura 280 °C, porcentaje en peso 2:1 y 15 minutos, y la peor: 280 °C, porcentaje en peso 3:1 y 25 min, con densidad de poros de: 1,03 poros/mm² y 0,28 poros/mm² respectivamente, para el rango de 0 a 20 micras la más importante, pues es el rango que más se aproxima al de una membrana de microfiltración (0,02-10 micras).

CONCLUSIONES

1. El método de sinterización es útil para preparar membranas poliméricas, pero la combinación de variables propuestas en el diseño experimental (figura 9), no es viable para obtener membranas con poro de diámetro promedio apto para microfiltración.
2. No se pudo determinar las variables experimentales que produzcan una membrana apropiada para microfiltración, pero si la combinación de mejores características, siendo la siguiente: temperatura 280 °C, tiempo de preparación 15 minutos y porcentaje en peso 2:1.
3. Según la prueba de Anova es conveniente trabajar con las siguientes variables experimentales: temperatura 280 °C, porcentaje en peso 2:1 y tiempo de 15 minutos, dado que con estas condiciones se obtienen los poros más pequeños posibles, para esta investigación en particular.
4. El rango en micras donde se obtuvo la mayor cantidad de poros de manera global fue en: 40-60 micras, debido al diámetro promedio de los cristales de cloruro de sodio.
5. La prueba que produjo más poros fue la doce para la segunda corrida, en el rango de 40-60 micras, con densidad de poros de 1,41 poros/mm².

RECOMENDACIONES

1. Por medio de la prueba Anova se logró determinar que mientras más equitativa es el porcentaje en peso, se obtienen poros más pequeños, por lo tanto se recomienda hacer pruebas con porcentaje en peso de: 1:1 y 1:2, principalmente, esperando obtener poros más pequeños a los de esta investigación.
2. Realizar pruebas utilizando únicamente PET, y operando a una temperatura levemente inferior a la de esta investigación (280 °C), para obtener poros, debido a la adherencia de las partículas, con propiedades suficientes para caracterizarlas, y concluir si el procedimiento es apto, para obtener el objetivo principal de esta investigación.
3. Hacer pruebas experimentales de laboratorio a las membranas preparadas, para evaluar la presión máxima que pueden soportar en una tubería, para comprobar si la presión que resisten es apta para el rango de presión de procesos de microfiltración.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Society for Testing and Materials. *Determining Bacterial retention of membrane filters utilized for liquid filtration*. Philadelphia: ASTM, 1983. 332 p.
2. ARANA VALENZUELA, Edgar Alejandro. *Instalación de estación experimental e implementación de práctica de laboratorio para el curso de separación por membranas selectivas*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 2013. 168 p.
3. BAKER, Richard W. *Membrane technology and applications*. 2a ed. California: Limusa, 2000. 535 p. ISBN: 0 07 135440 9.
4. BIRD, R. Byron. *Fenómenos de transporte*. 2a ed. México. D.F: Limusa, 2013. 1048. p. ISBN: 978-968-18-6365-4.
5. BROWN, Brounsten; et al. *Química la ciencia central*. 11a ed. México: Apolo, 2009. 1240. p. ISBN: 978-607-442-021-0.
6. CROSS, R. A. *Purification of drinking water with ultrafiltration*. Eleventh Annual Membrane Technology/Separations Planning Conference. Newton, MA, USA october 1993. 231 p.

7. Ecogua. *Operaciones unitarias de separación*. [en línea] <<http://www.google.com.gt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0CC8QFjAD&url=http%3A%2F%2F>> [Consulta: 15 marzo de 2014].
8. GEANKOPLIS, Christie John. *Procesos de transporte y principios de procesos de separación*. 4a ed. México: Continental, 2006. 1019 p. ISBN: 970-24-0856-3.
9. GONZÁLEZ RODRIGUEZ, Diana Marcela. *Síntesis y caracterización de una membrana de intercambio aniónico con aplicación en celdas de combustible alcalinas*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Facultad de Minas, Escuela de Procesos y Energía, 2009. 20 p.
10. HERNÁNDEZ PÉREZ, Fidencio. *Preparación de membranas poliméricas para el endulzamiento de gas natural*. [en línea]. <<file:///C:/Users/USER/Desktop/antecedentes/tesis%202.htm>> [Consulta: 02 de agosto de 2015].
11. MASON, E. A. *Molecular physics*. USA: University of Maryland, 1967. 344 p.
12. MICHAELS, A. S. *High flow membrane*. US Patent 3,615,024 (October, 1971).
13. MULDER, M. *Basic principles of membrane technology*. 2da ed. Argentina: Kluwer Academic Publishers, 2004. 67 p.

14. PORTER, M. C. *Microfiltration, in Handbook of Industrial Membrane Technology*. 2a ed. Park Ridge: Noyes Publications, 1999. 31 p.
15. SCIELO. *Elaboración de membranas poliméricas porosas a partir de cristales coloidales*. [en línea], <file:///C:/Users/USER/Desktop/antecedentes/articulo%201%20membranas.htm.> [Consulta: 02 de agosto de 2015].
16. TORRE TORRES, Oscar Valdemar. *Estadística inferencial paramétrica, no paramétrica y multivariante*. Chile: Facultad de Contaduría y Ciencias Administrativas, Academia de Matemáticas, 2012. 151 p.
17. ULBRICHT, Mathias. *Advanced functional polymer membranes*. [en línea] <www.sciencedirect.com.> [Consulta: 10 de junio de 2014].
18. Universidad de Valladolid, Departamento de Química Orgánica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, *Ingenieros ARTTEC007*. [en línea] <http://www.eis.uva.es/~macromol/curso0506/pet/propiedades_y_caracteristicas.htm.> [Consulta: 17 de mayo de 2015].
19. VAINROT, N. M. S. *Membranes in desalination and water treatment*. [en línea] <www.oocities.org/edrochac/sanitaria/membranas.htm.> [Consulta: 21 de septiembre de 2015].
20. WALPOLE, Ronald E. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 9a ed. México: Ingramex, 2012. 816 p. ISBN: 978-607-32-1417-9.

APÉNDICES

Apéndice 1. Muestra de cálculo

a) Densidad de poros

Se determinó la densidad de poros para la prueba 5, primera corrida.

$$\rho = \text{Total de poros/ área contabilizada} = 523 \text{ poros}/160 \text{ mm}^2 = 3,27 \text{ poros/mm}^2.$$

Nota: se calculó la densidad de poros para el resto de pruebas de la misma forma.

b) Media de una población

Se determinó el promedio de los poros contabilizados para la prueba 5, primera corrida.

$$\bar{x} = \frac{105+122+103+80+52+34+14+13}{8} = 65,37$$

Nota: se calculó la media, para el resto de pruebas de la misma forma.

c) Desviación estándar

Se determinó la desviación estándar de los diámetros promedios para la prueba 5, primera corrida.

$$s = \frac{(105-65,37)^2+(122-65,37)^2+(103-65,37)^2+(80-65,37)^2+(52-65,37)^2+\dots\alpha}{8} \\ = 40,23$$

Nota: se calculó la desviación estándar, para el resto de pruebas de la misma forma.

d) Gran media

Se determinó la gran media para las pruebas 5 y 6, para ambas primera corrida.

$$\bar{x} = \frac{65,38+87,50}{2} = 76,44$$

Nota: se calculó la gran media, para el resto de comparaciones de la misma forma.

e) Varianza entre medias muestrales

Se determinó la varianza entre medias para las pruebas 5 y 6, primera corrida para ambas.

$$\beta^2 = \frac{(10(65,37-76,44)^2)+(10(87,50-76,44)^2)}{1} = 2447,58$$

Nota: se calculó la varianza entre medias, para el resto de comparaciones de la misma forma.

f) Varianza total de las muestras en conjunto

Se determinó la varianza de los datos en conjunto de las pruebas 5 y 6, ambas primera corrida.

$$\xi^2 = \frac{((40,24)^2(10-1))+((145,54)^2(10-1))}{18} = 92,89.$$

Nota: se calculó la varianza total de las muestras en conjunto, para el resto de comparaciones de la misma forma.

g) Estadístico F

Se determinó el estadístico F, para comparar las pruebas 5 y 6, primera corrida para ambas.

$$F = \frac{2447,58}{92,89} = 26,35.$$

Estadístico $F > 4,28$ conclusión: se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alterna, por lo tanto si existe diferencia en la distribución de poros, para las pruebas mencionadas.

Nota: se calculó el estadístico F, para el resto de comparaciones de la misma forma.

Apéndice 2. **Fotografías de los trabajos preliminares para reducir y homogenizar el tamaño de partícula de la materia prima**

Figura1. **Tereftalato de polietileno tamaño de partícula promedio de 3 mm**



Fuente: Reciclados de Centro América avenida Petapa zona 12, Guatemala

Figura 2. **Representación del PET solidificado y preparado para moler en el molino de martillos**



Fuente: Área de Tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 3. **Molino de martillos en elevación y perfil**



Fuente: Área de Tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 4. **Morfología del tereftalato de polietileno después operar en el molino de martillos**



Fuente: área de tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 5. Molino de bolas en elevación y perfil



Fuente: Área de Tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 6. **Morfología del tereftalato de polietileno después de operar en el molino de bolas**



Fuente: Área de Tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 7. **Pulverización o refinación del NaCl con mortero y pistilo**



Fuente: Área de tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Apéndice 3. **Fotografías previo a preparar las membranas**

Figura 8. **Balanza analítica del laboratorio marca Radwag**



Fuente: Área de Tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 9. **Horno del laboratorio marca Oven**



Fuente: Área de Tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

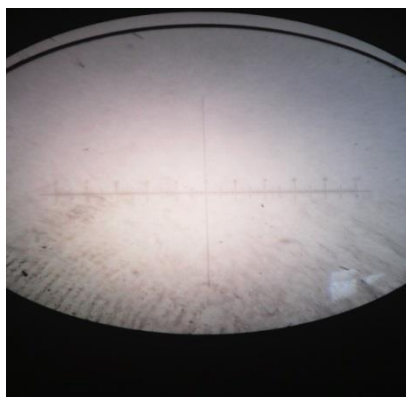
Apéndice 4. **Fotografías obtenidas en el Laboratorio de Microbiología de la Escuela de Ingeniería Química de la Usac**

Figura 10. **Microscopio del Laboratorio de Microbiología**



Fuente: microscopio del Laboratorio de Microbiología de la Escuela de Ingeniería Química de la Usac.

Figura 10. **Detalle del micrómetro ocular utilizado en el Laboratorio de Microbiología**



Fuente: Laboratorio de Microbiología de la Escuela de Ingeniería Química de la Usac.

Figura 11. **Detalle de los estratos preparados para ser evaluados en el microscopio**



Fuente: segunda fase del diseño experimental, realizada en el Laboratorio de Microbiología de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Apéndice 5. **Fotografías obtenidas de las pruebas realizadas a diferentes condiciones**

Figura 12. **Prueba 1**

Porcentaje en peso (PET:NaCl)	Base porosa (2:1)
	Estrato selectivo denso (2:1)
Temperatura de preparación	260 °C
Tiempo de preparación	15 minutos



Fuente: diseño experimental, realizada en Área de Tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

Figura 13. **Prueba 2**

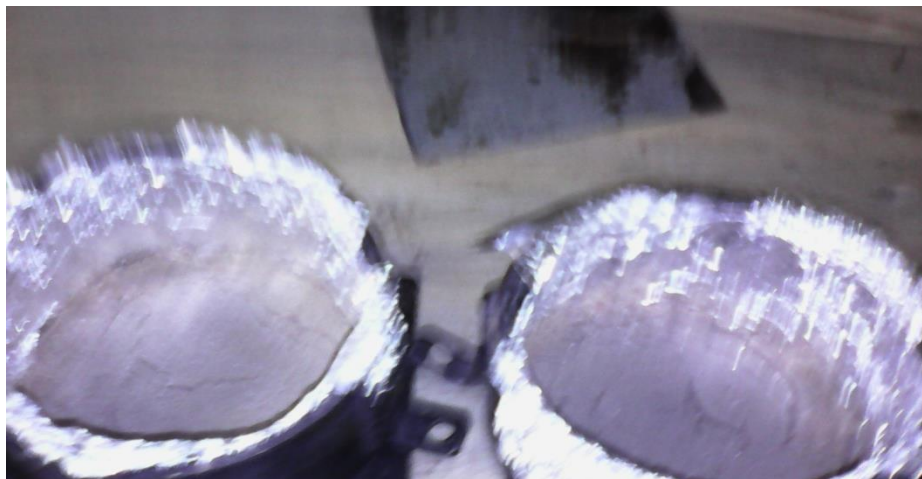
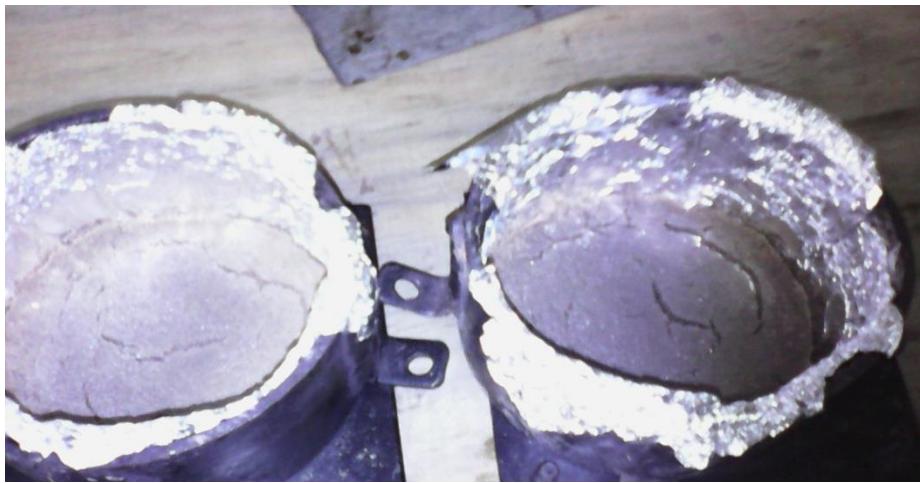
Porcentaje en peso (PET:NaCl)	Base porosa (2:1)
	Estrato selectivo denso (2:1)
Temperatura de preparación	260 °C
Tiempo de preparación	25 minutos



Fuente: diseño experimental, realizada en Área de Tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

Figura 14. Prueba 3

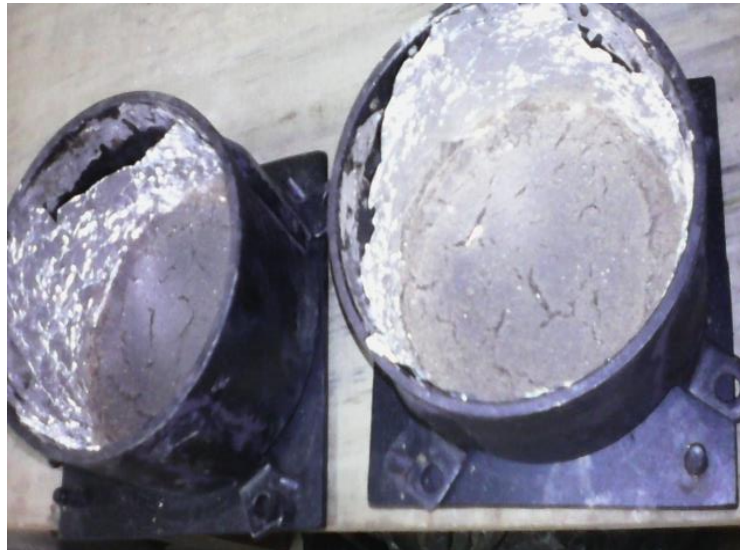
Porcentaje en peso (PET:NaCl)	Base porosa (2:1)
	Estrato selectivo denso (2:1)
Temperatura de preparación	270 °C
Tiempo de preparación	15 minutos



Fuente: diseño experimental, realizada en Área de Tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

Figura 15. Prueba 4

Porcentaje en peso (PET:NaCl)	Base porosa (2:1)
	Estrato selectivo denso (2:1)
Temperatura de preparación	270 °C
Tiempo de preparación	25 minutos



Fuente: diseño experimental, realizada en Área de Tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

Figura 16. Prueba 5

Porcentaje en peso (PET:NaCl)	Base porosa (2:1)
	Estrato selectivo denso (2:1)
Temperatura de preparación	280 °C
Tiempo de preparación	15 minutos



Fuente: diseño experimental, realizada en Área de Tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

Figura 17. Prueba 6

Porcentaje en peso (PET:NaCl)	Base porosa (2:1)
	Estrato selectivo denso (2:1)
Temperatura de preparación	280 °C
Tiempo de preparación	25 minutos



Fuente: diseño experimental, realizada en Área de Tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

Figura 18. Prueba 7

Porcentaje en peso (PET:NaCl)	Base porosa (2:1)
	Estrato selectivo denso (3:1)
Temperatura de preparación	260 °C
Tiempo de preparación	15 minutos



Fuente: diseño experimental, realizada en Área de Tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

Figura 19. **Prueba 8**

Porcentaje en peso (PET:NaCl)	Base porosa (2:1)
	Estrato selectivo denso (3:1)
Temperatura de preparación	260 °C
Tiempo de preparación	25 minutos



Fuente: diseño experimental, realizada en Área de Tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

Figura 20. **Prueba 9**

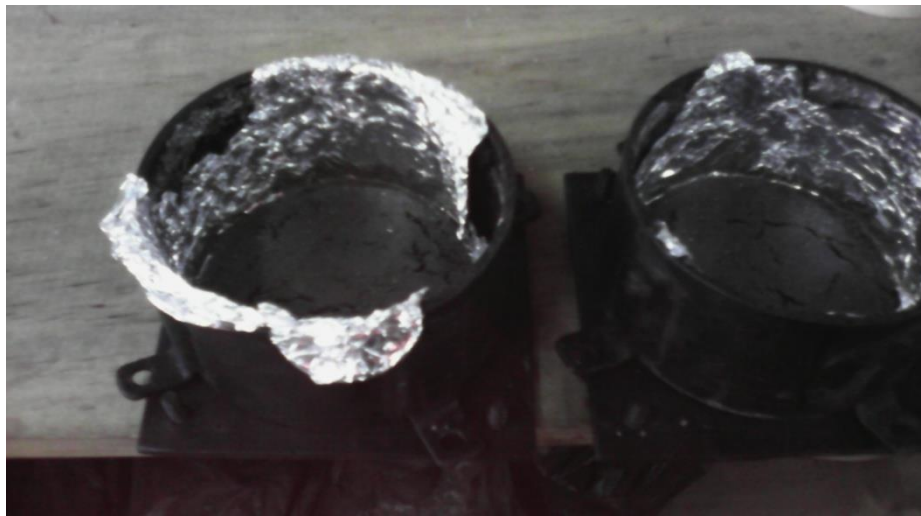
Porcentaje en peso (PET:NaCl)	Base porosa (2:1)
	Estrato selectivo denso (3:1)
Temperatura de preparación	270 °C
Tiempo de preparación	15 minutos



Fuente: diseño experimental, realizada en Área de Tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

Figura 21. **Prueba 10**

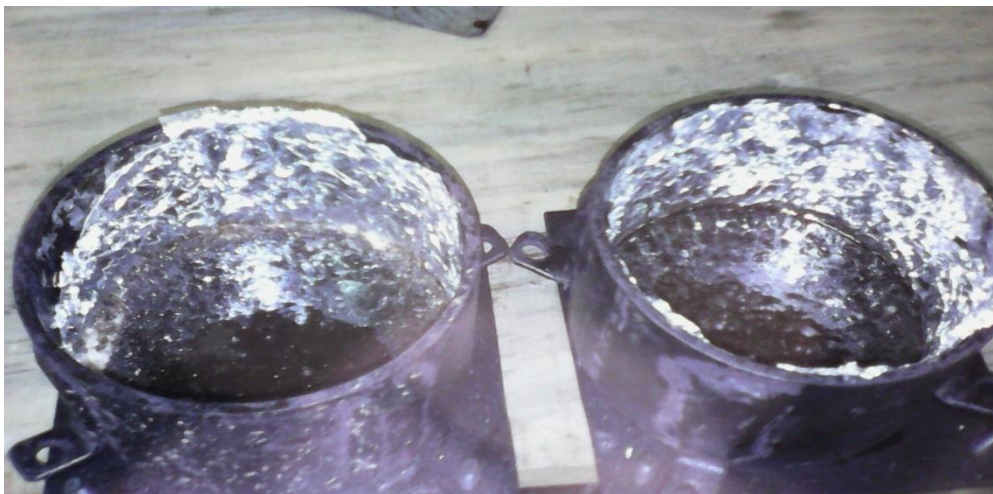
Porcentaje en peso (PET:NaCl)	Base porosa (2:1)
	Estrato selectivo denso (3:1)
Temperatura de preparación	270 °C
Tiempo de preparación	25 minutos



Fuente: diseño experimental, realizada en Área de Tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

Figura 22. Prueba 11

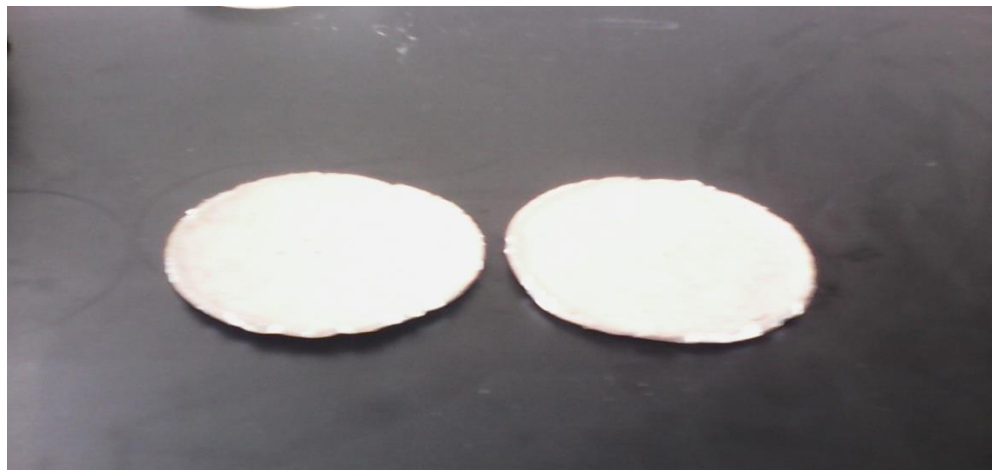
Porcentaje en peso (PET:NaCl)	Base porosa (2:1)
	Estrato selectivo denso (3:1)
Temperatura de preparación	280 °C
Tiempo de preparación	15 minutos



Fuente: diseño experimental, realizada en Área de Tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

Figura 23. **Prueba 12**

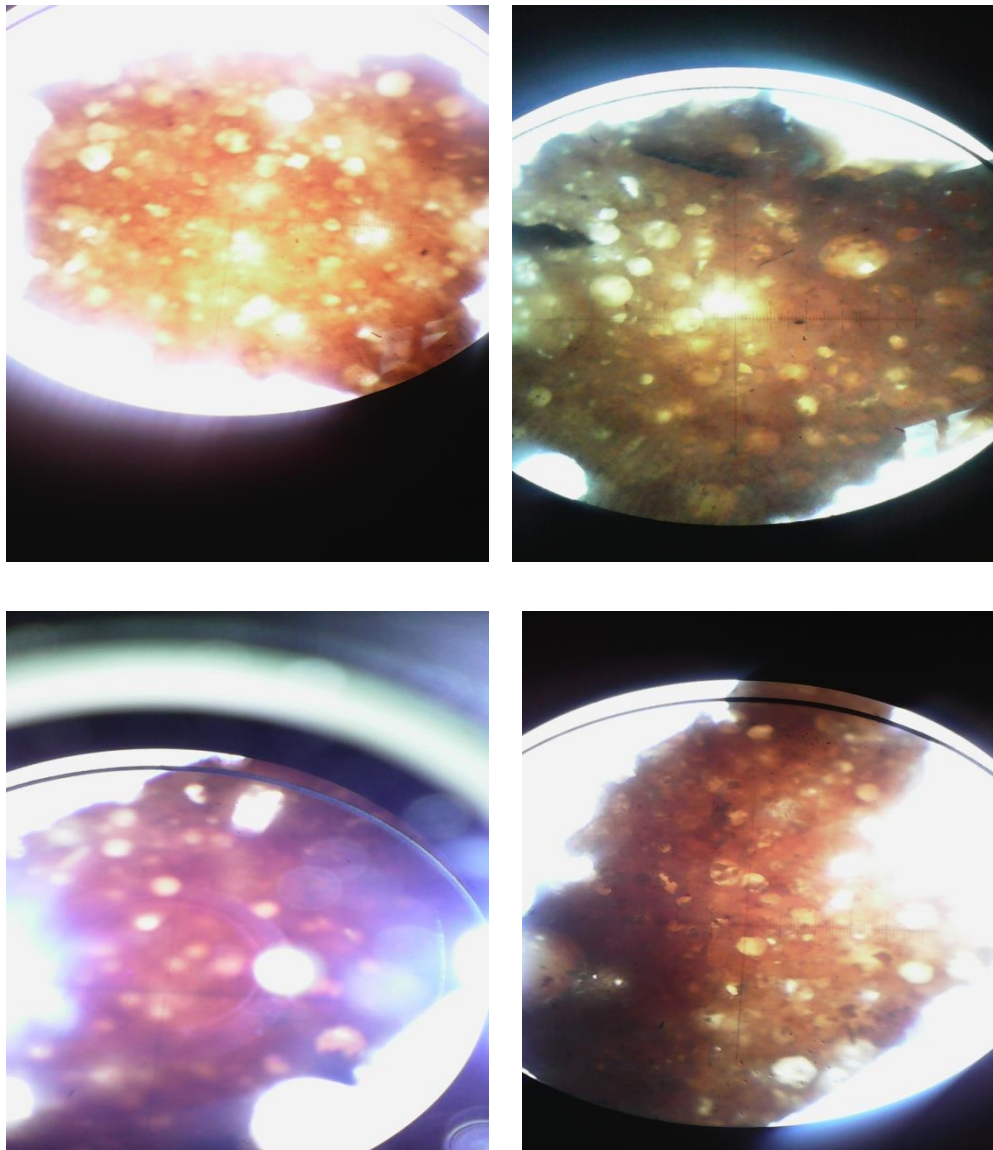
Porcentaje en peso (PET:NaCl)	Base porosa (2:1)
	Estrato selectivo denso (3:1)
Temperatura de preparación	280 °C
Tiempo de preparación	25 minutos



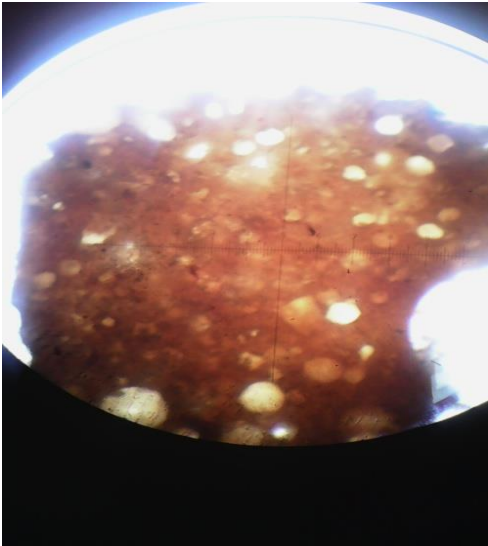
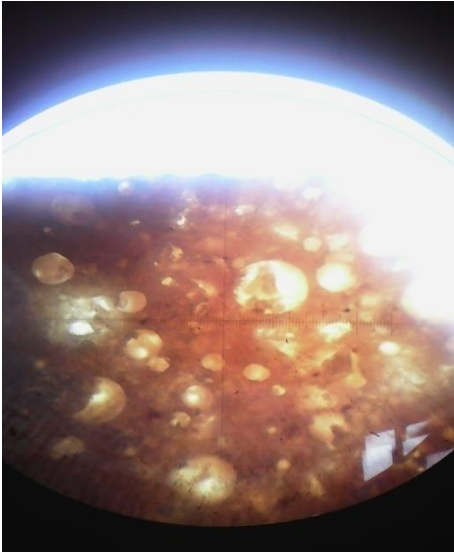
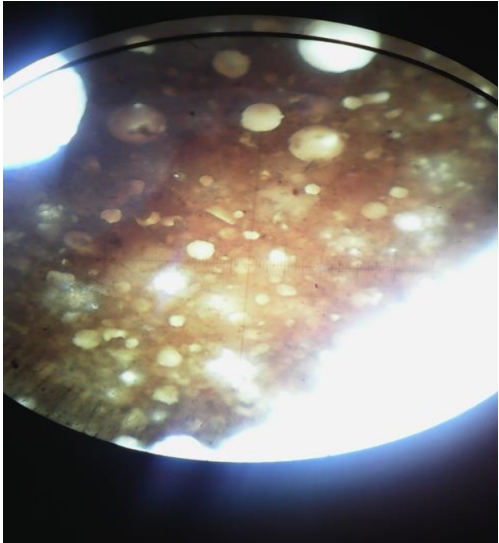
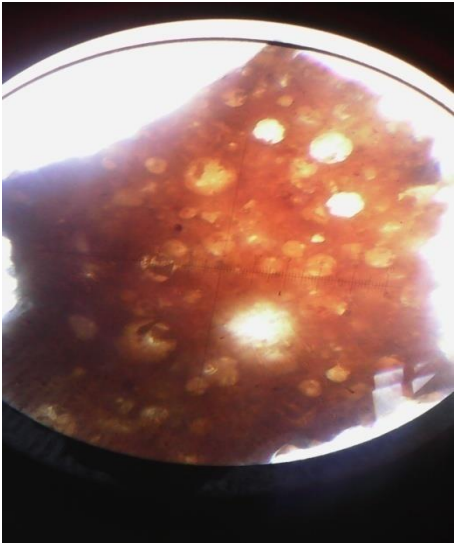
Fuente: diseño experimental, realizada en Área de Tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

Apéndice 6. **Fotografías obtenidas en el Laboratorio de Microbiología**

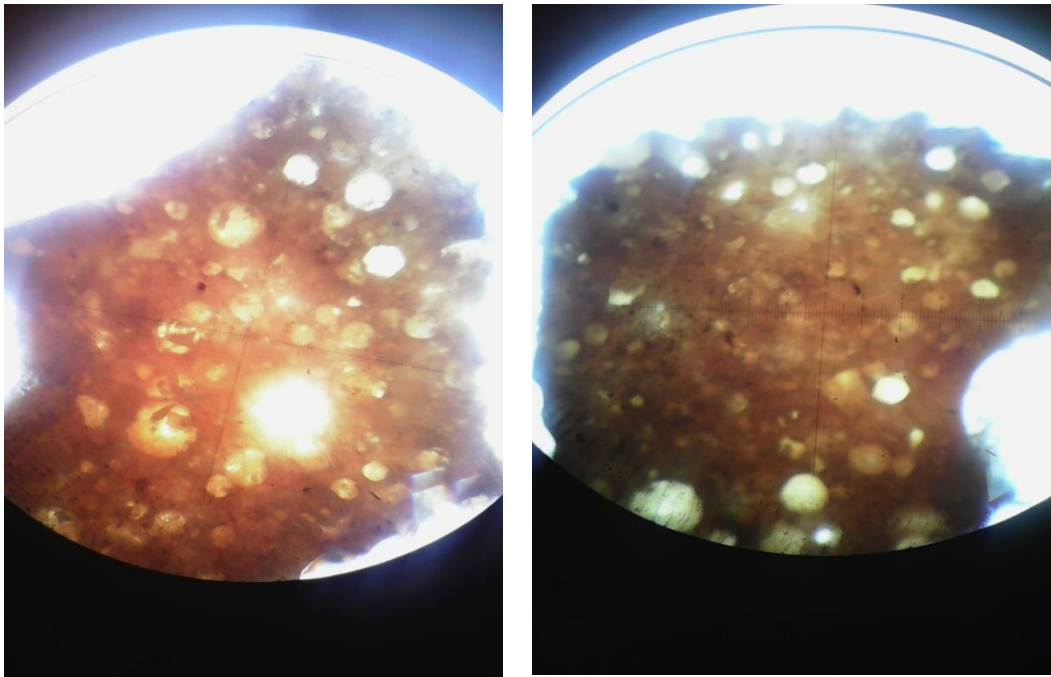
Figura 24. **Fotografías de la prueba 5, primera corrida**



Continuación del apendice 6, figura 24.

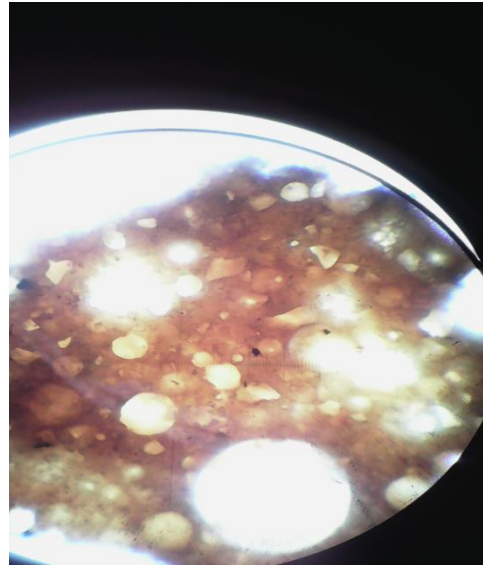
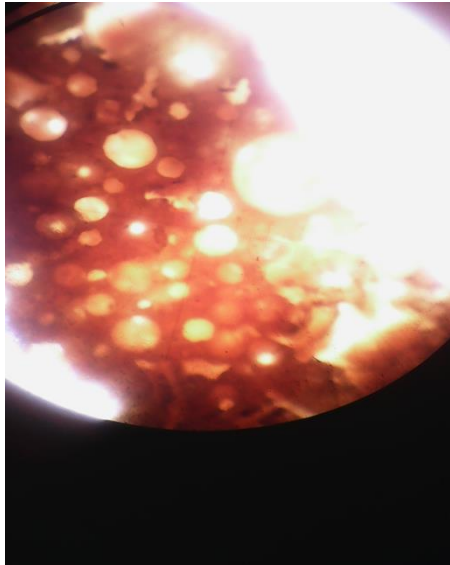
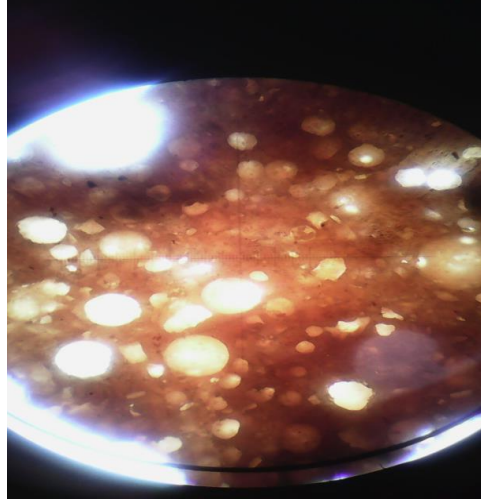
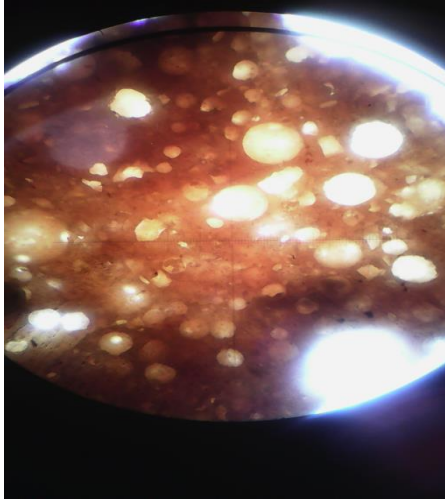


Continuación del apéndice 6, figura 24.

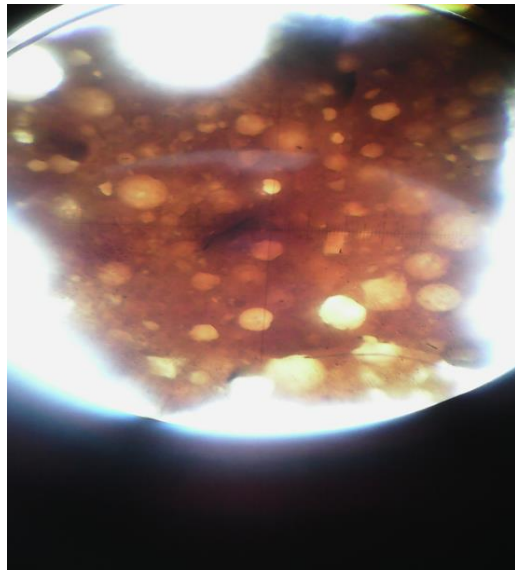
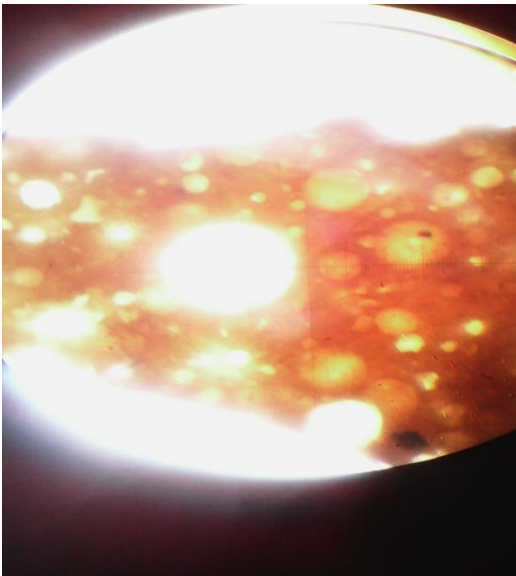
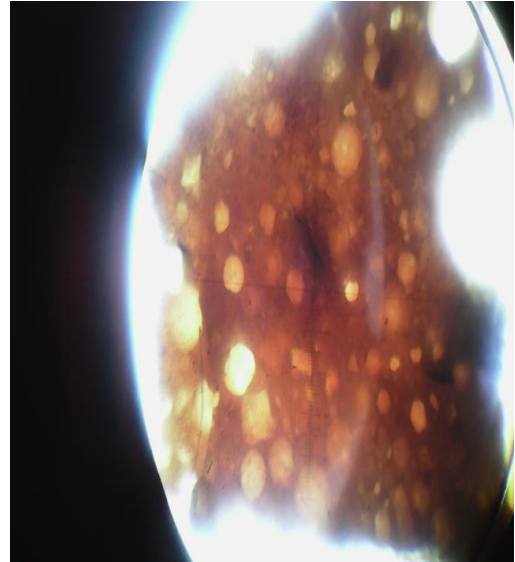
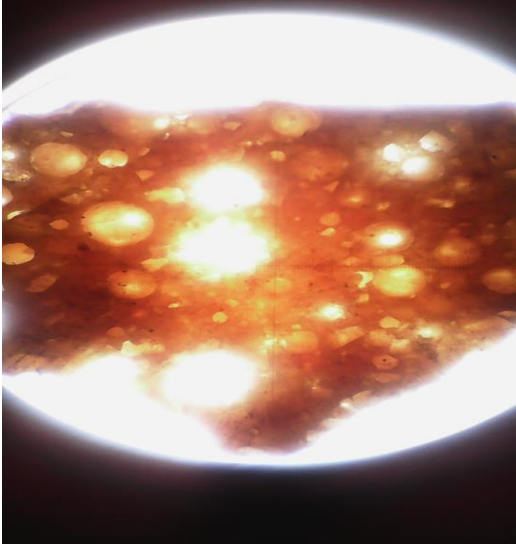


Fuente: segunda fase del procedimiento experimental, realizada en el Laboratorio de Microbiología de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

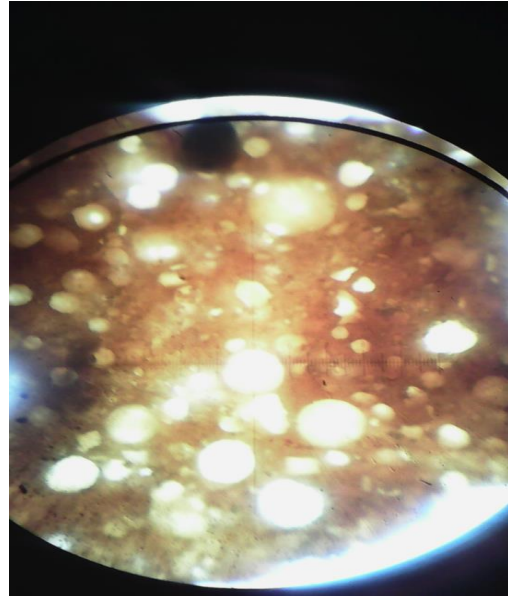
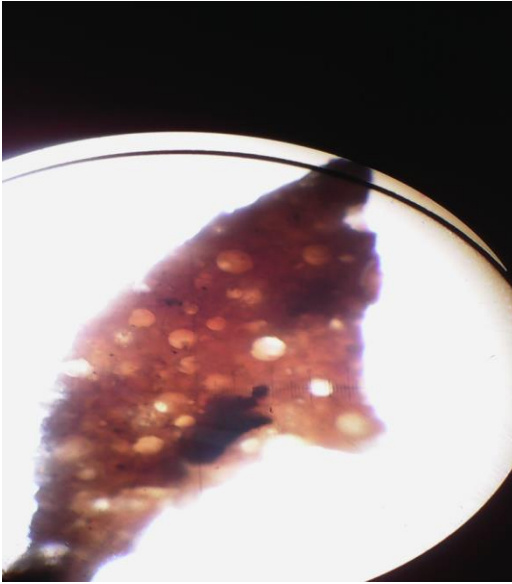
Figura 25. **Fotografías de la prueba 5, segunda corrida**



Continuación del apéndice 6, figura 25.

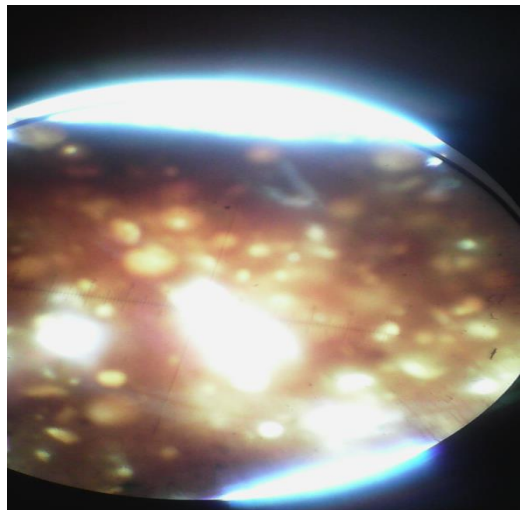
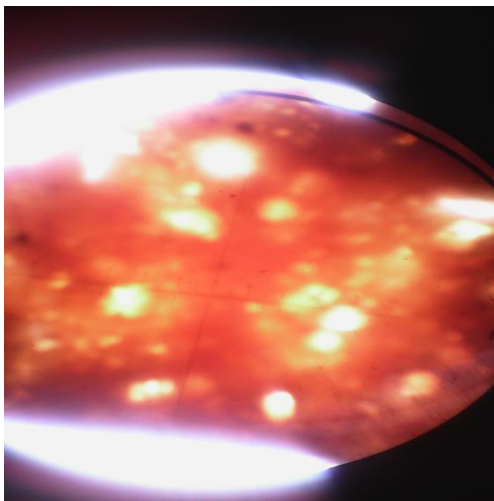
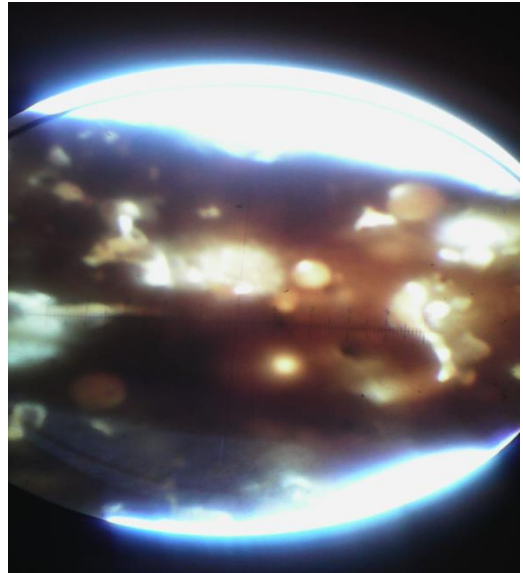
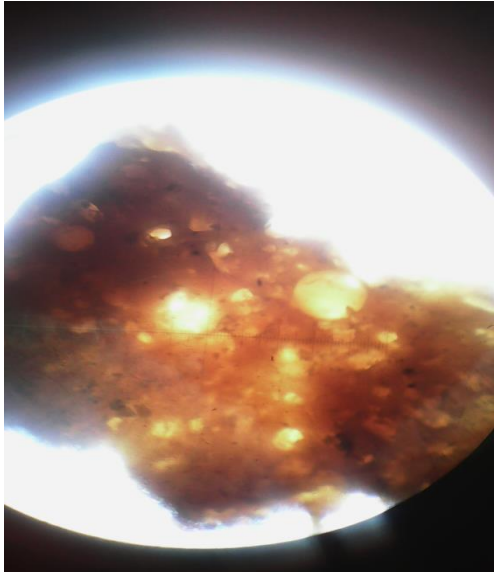


Continuación del apéndice 6, figura 25.

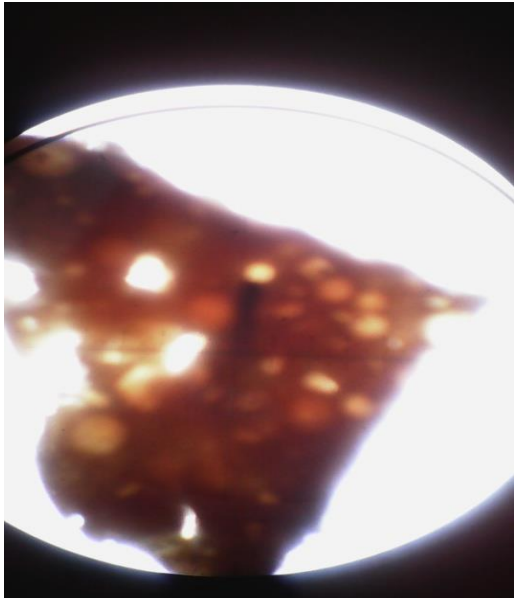
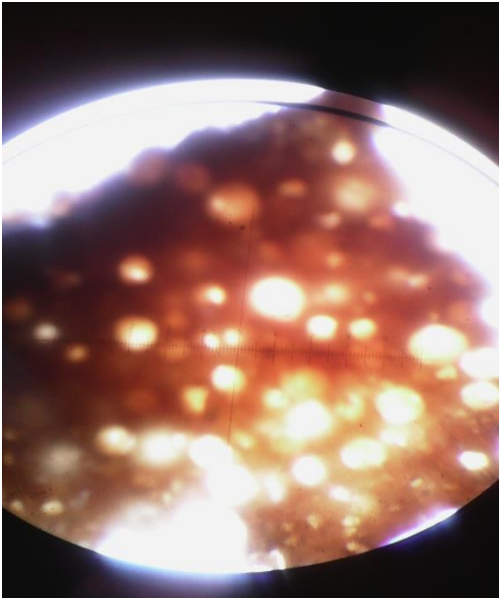
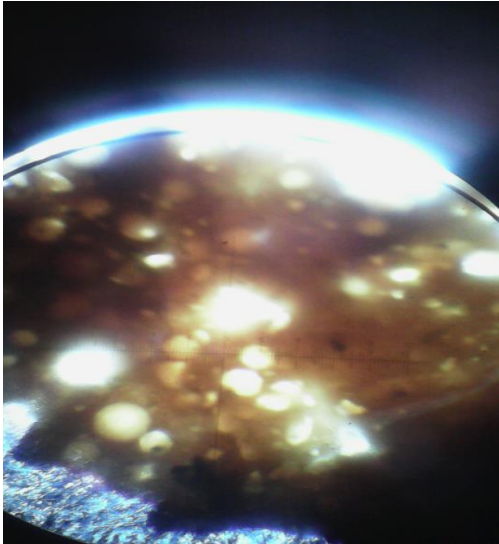
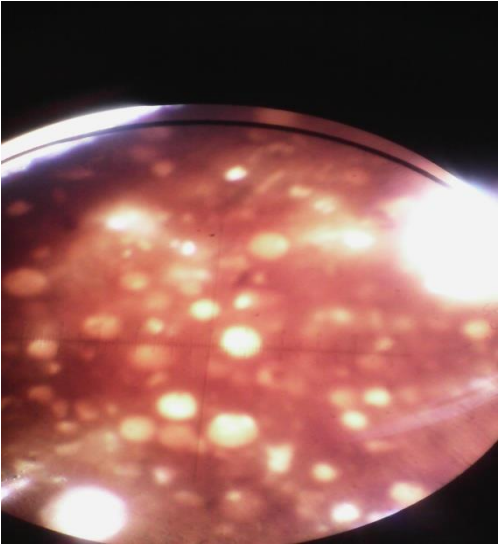


Fuente: segunda fase del procedimiento experimental, realizada en el Laboratorio de Microbiología de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

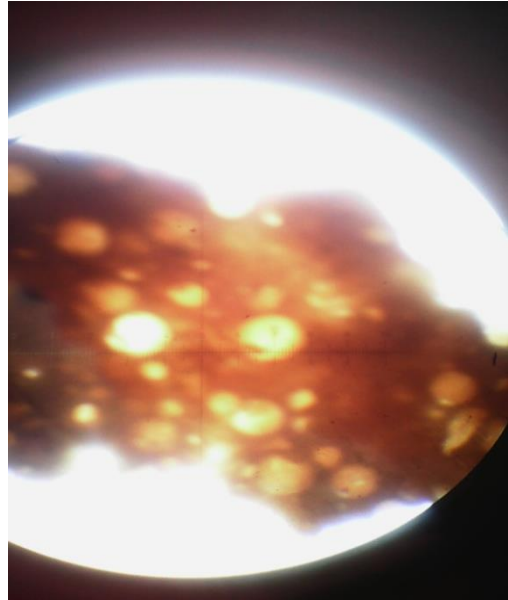
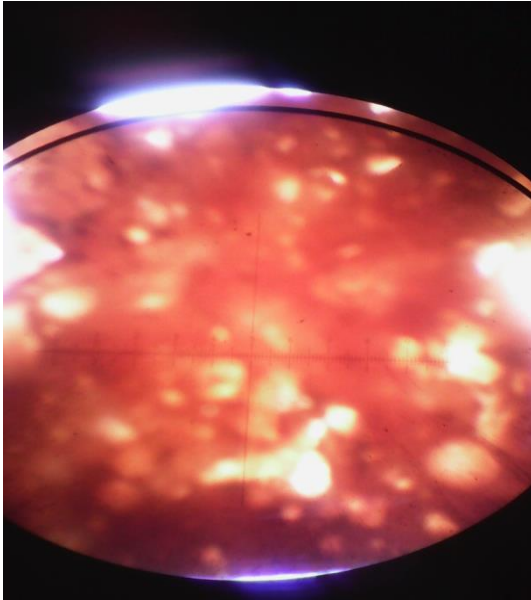
Figura 26. **Fotografías de la prueba 6, primera corrida**



Continuación del apéndice 6, figura 26.

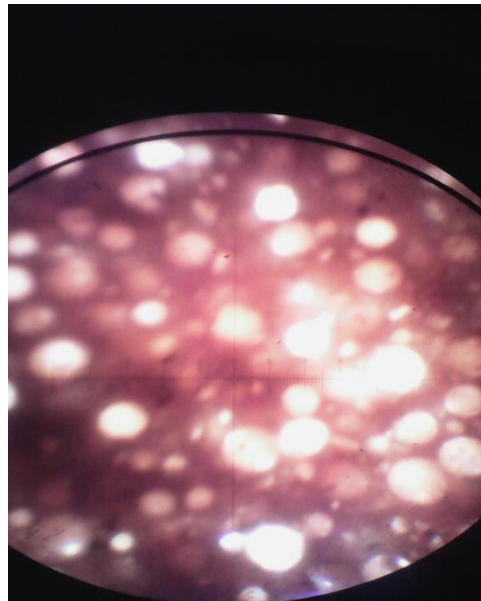
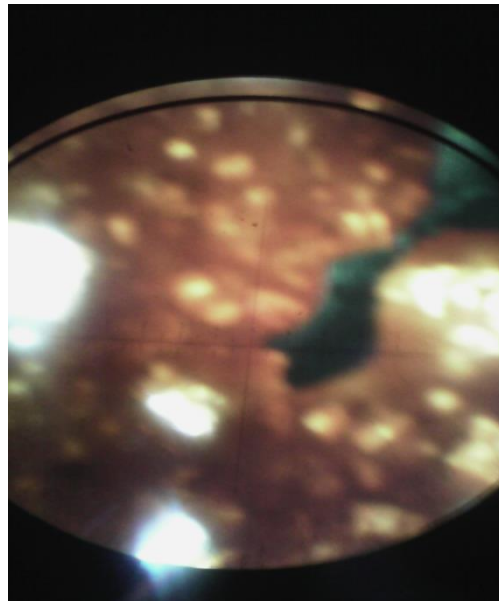
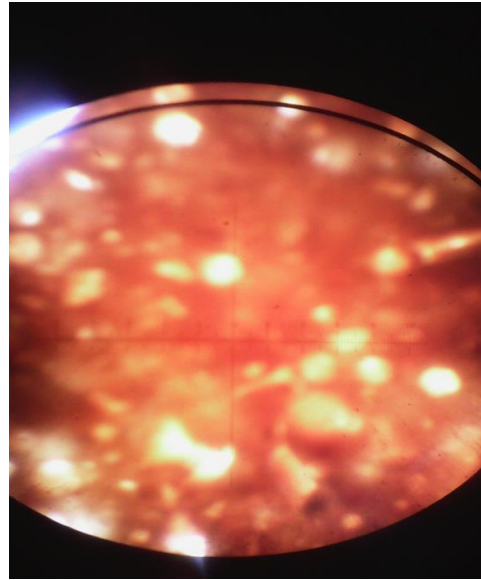
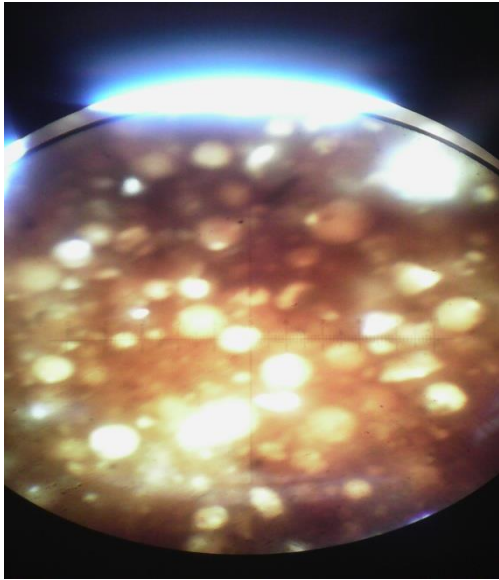


Continuación del apéndice 6, figura 26.

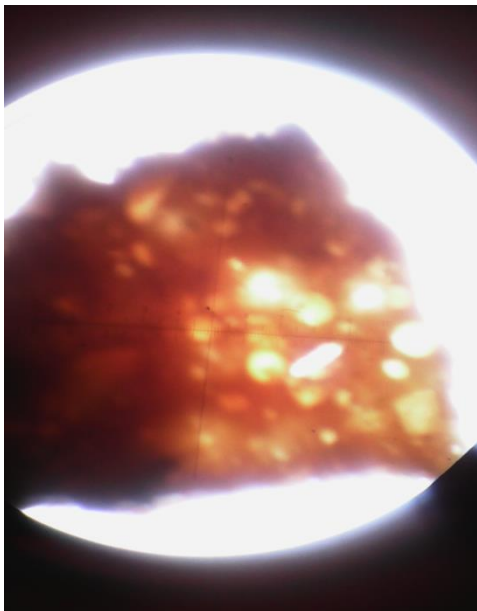
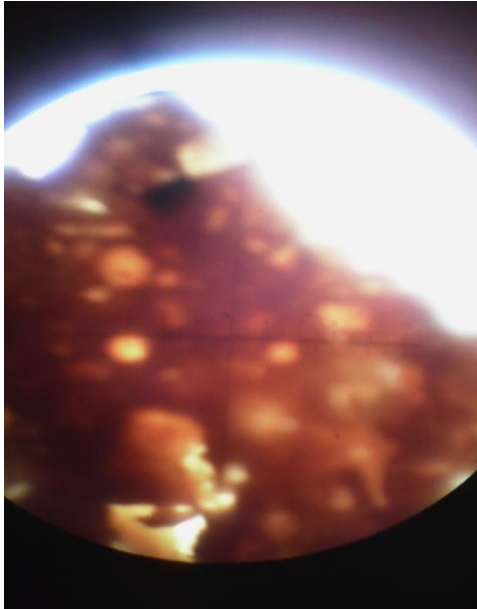


Fuente: segunda fase del procedimiento experimental, realizada en el Laboratorio de Microbiología de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

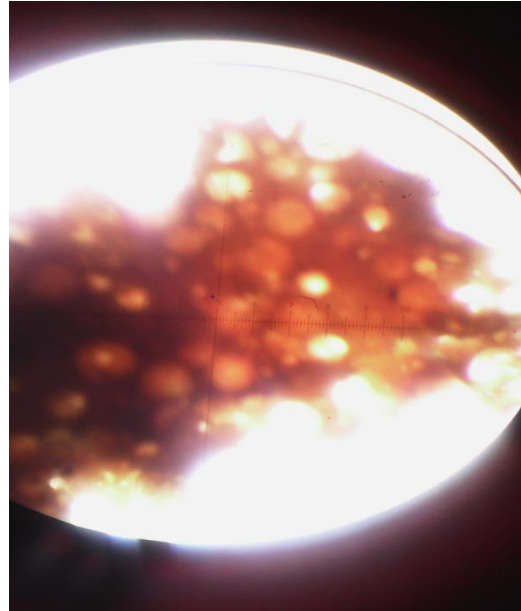
Figura 27. **Fotografías de la prueba 6, segunda corrida**



Continuación del apéndice 6, figura 27.

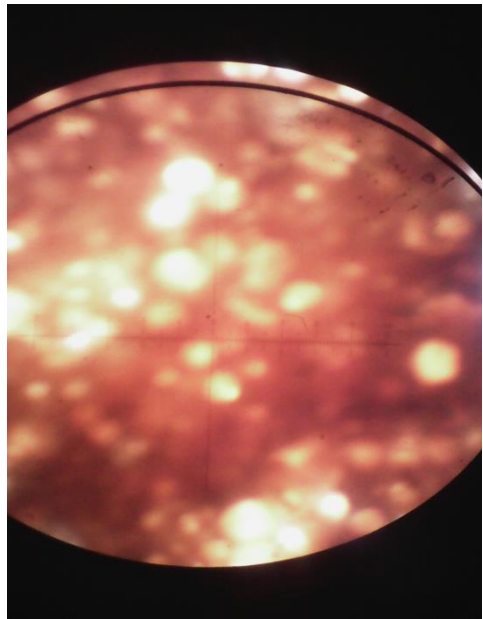
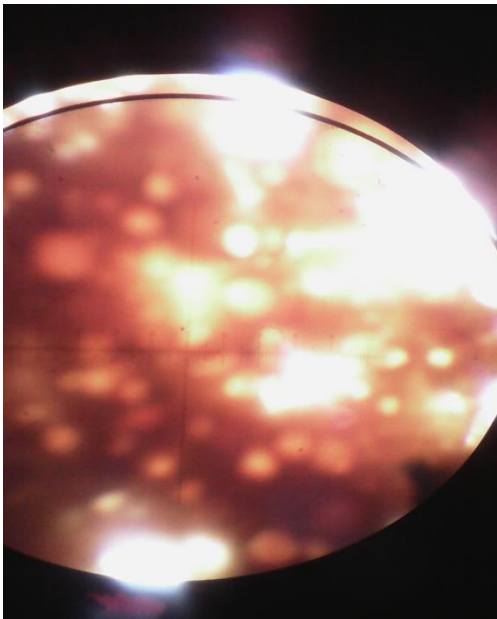
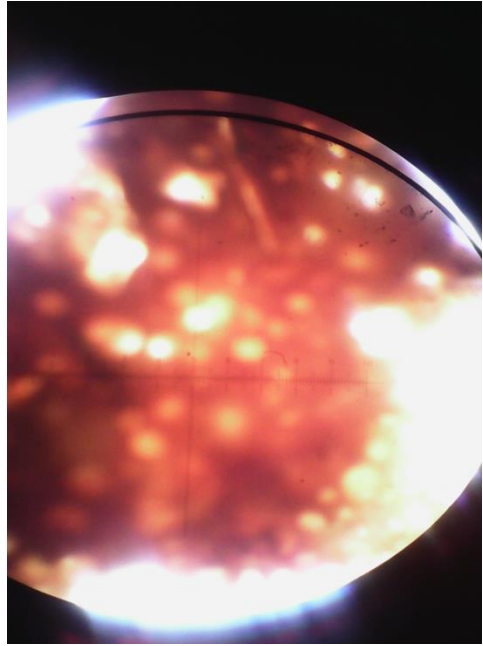
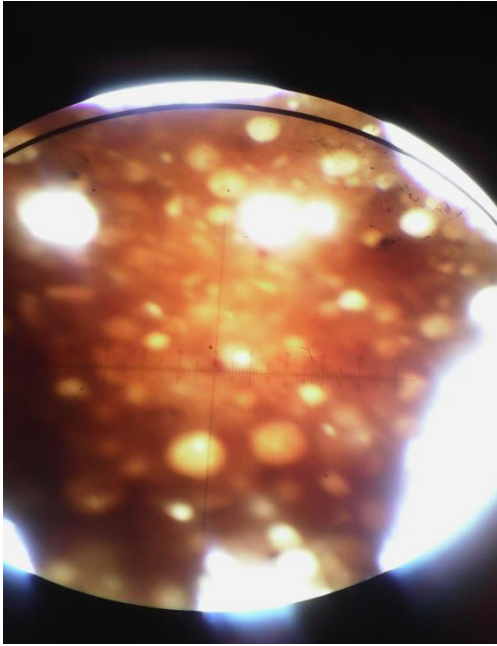


Continuación del apéndice 6, figura 27.

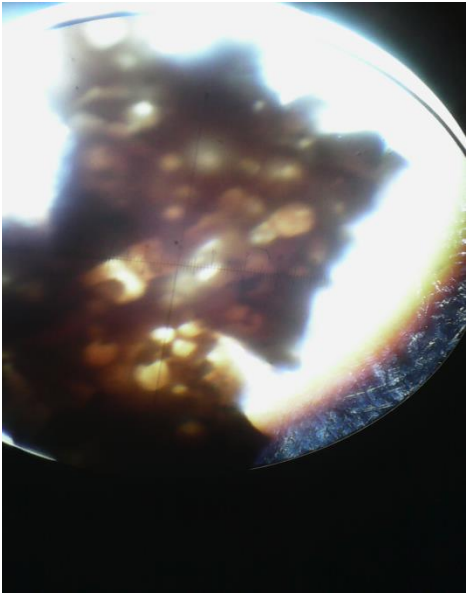
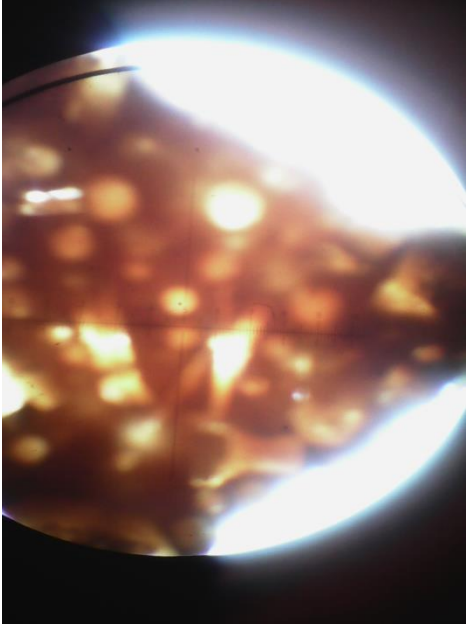
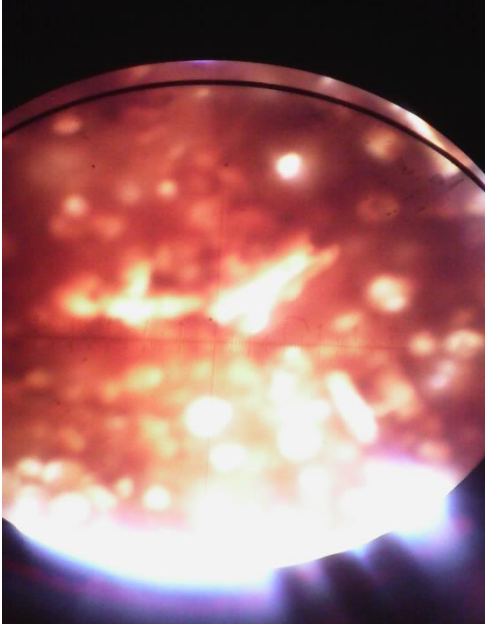


Fuente: segunda fase del procedimiento experimental, realizada en el Laboratorio de Microbiología de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

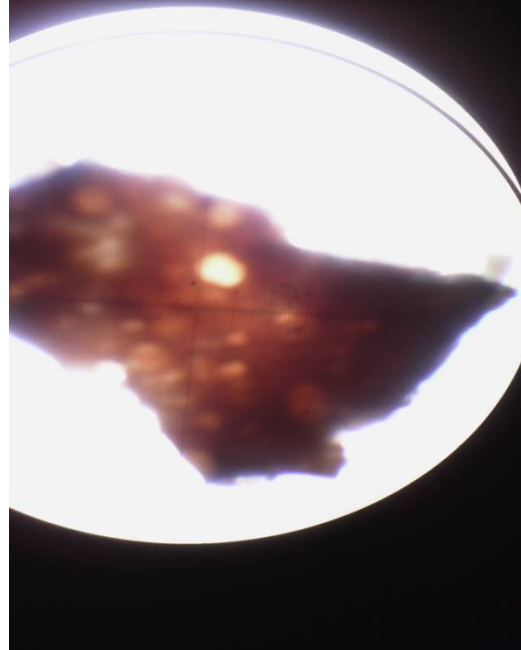
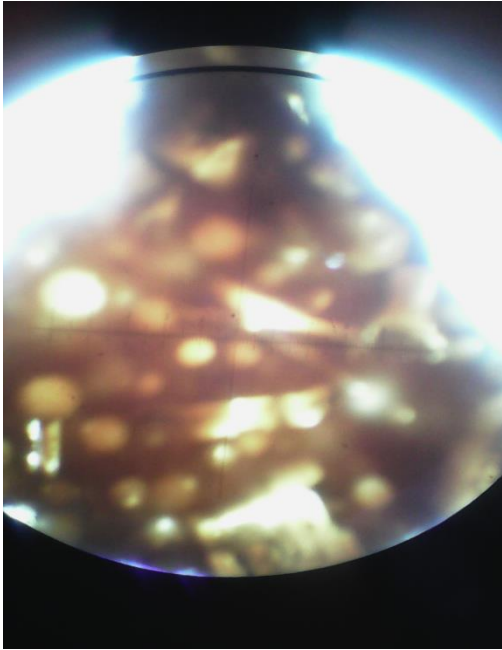
Figura 28. **Fotografías de la prueba 11, primera corrida**



Continuación del apéndice 6, figura 28.

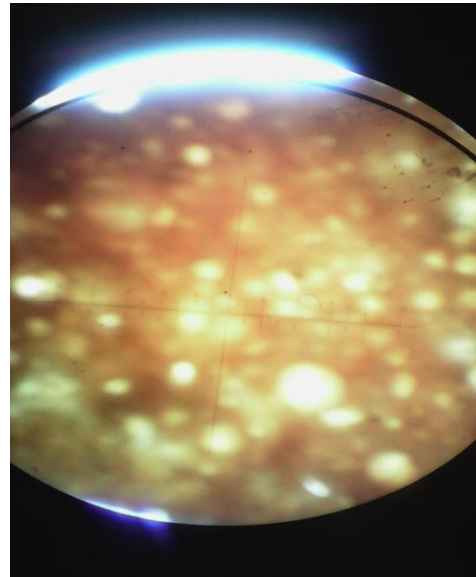
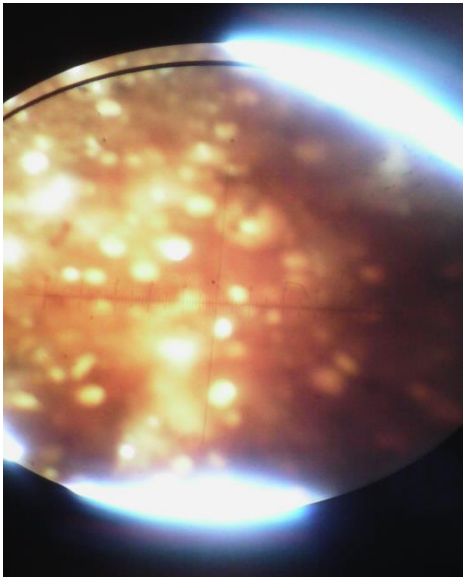
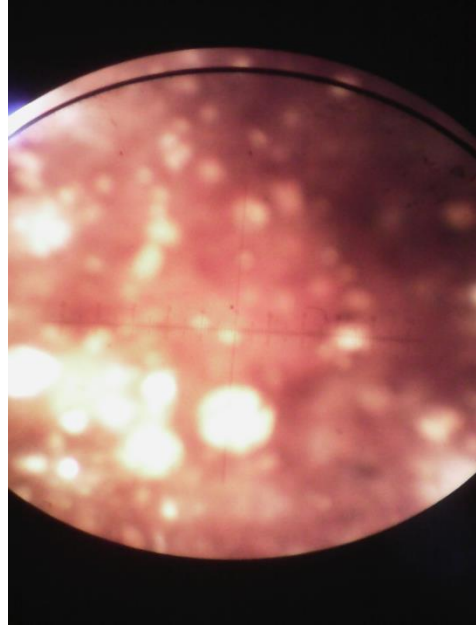
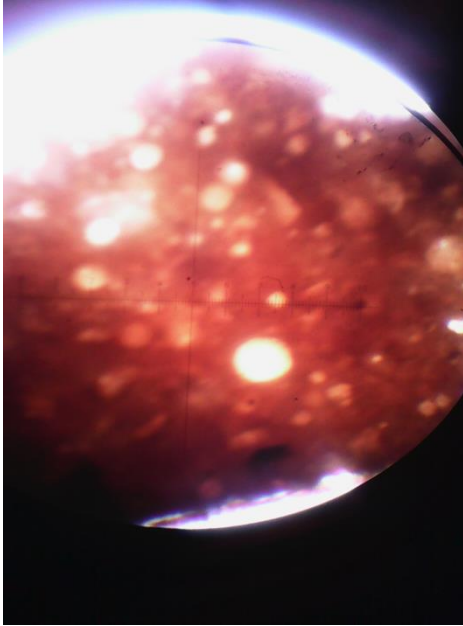


Continuación del apéndice 6, figura 28.

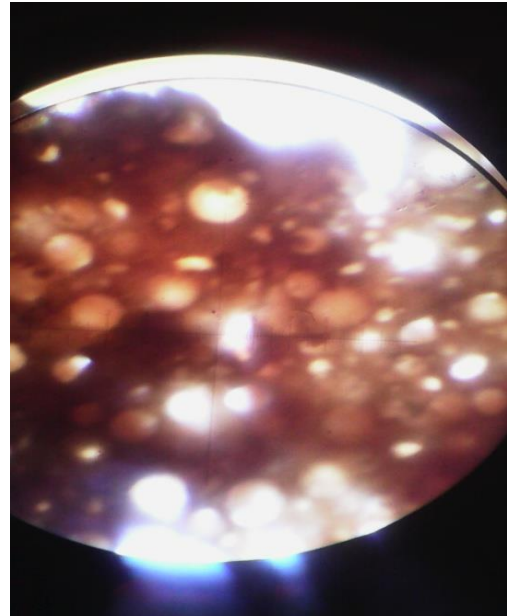
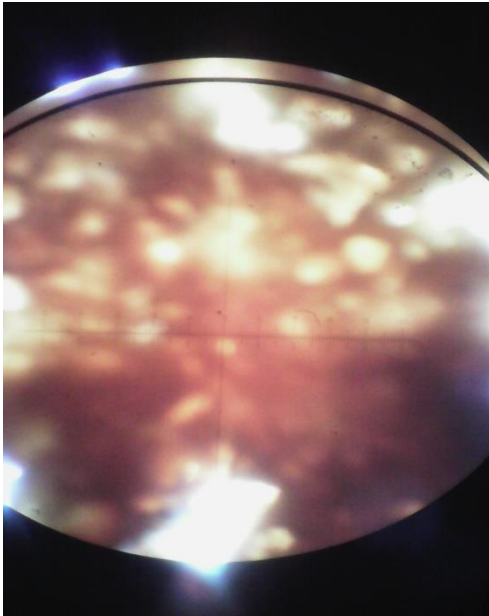
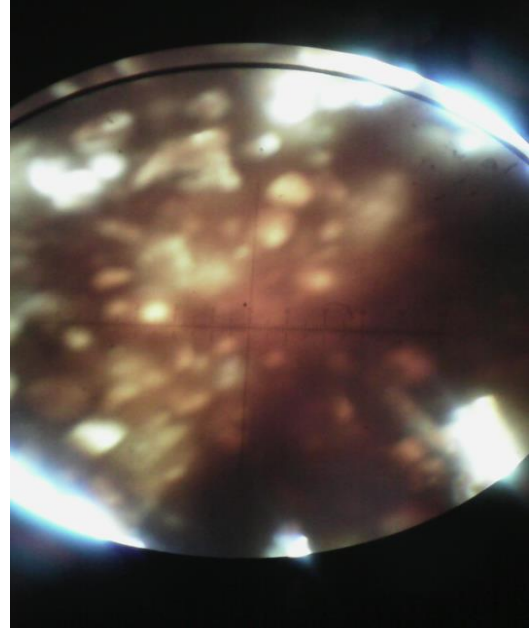
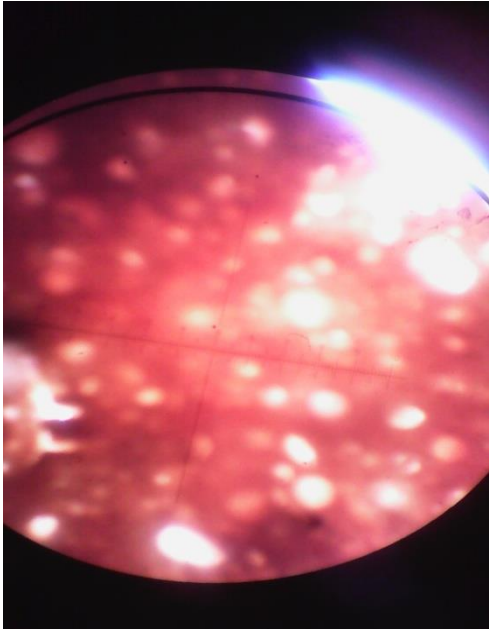


Fuente: segunda fase del procedimiento experimental, realizada en el Laboratorio de Microbiología de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

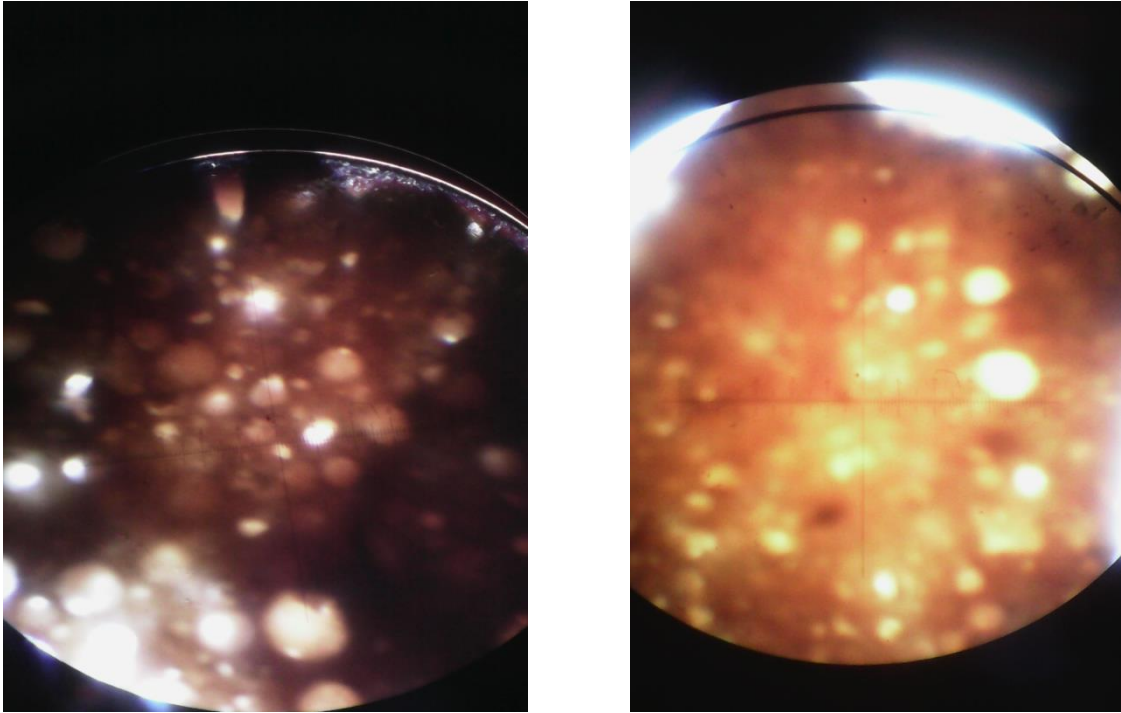
Figura 29. Fotografías de la prueba 11, segunda corrida



Continuación del apéndice 6, figura 29.

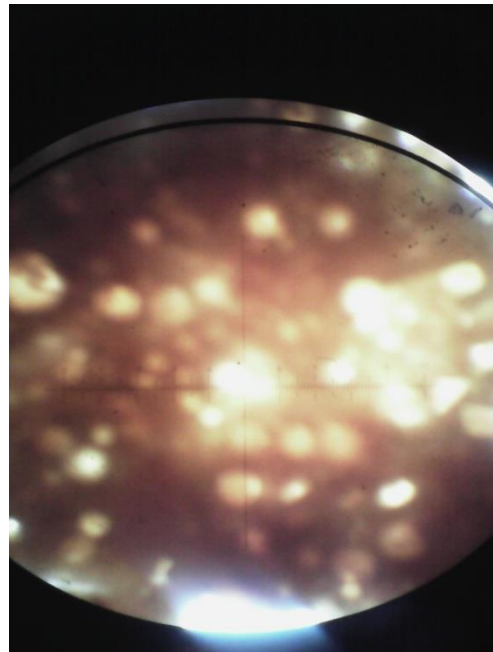
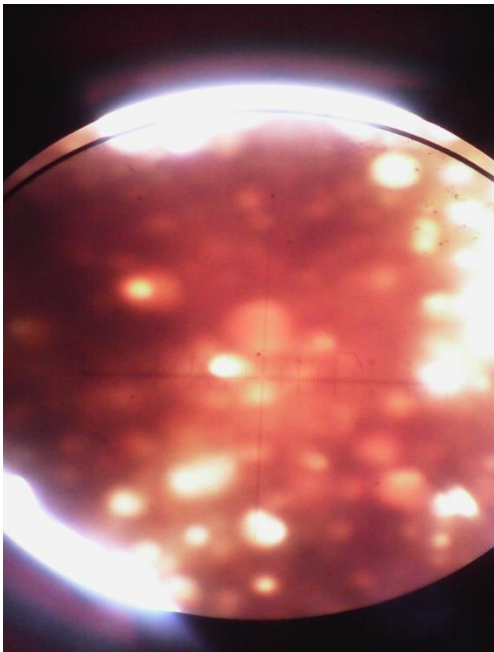
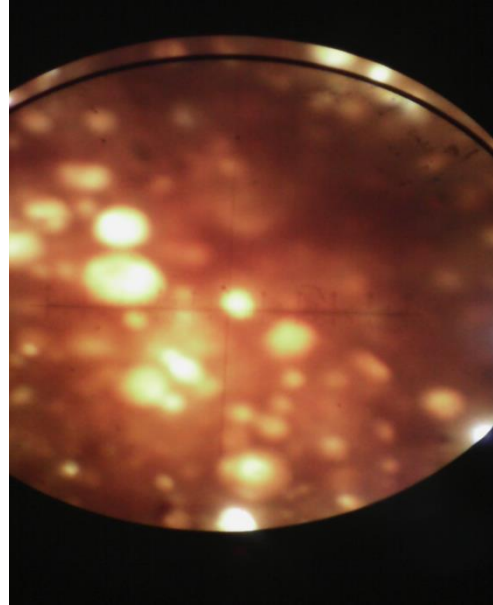
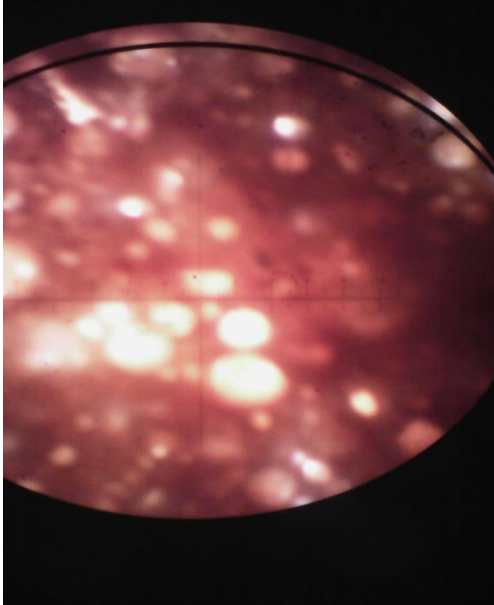


Continuación del apéndice 6, figura 29.

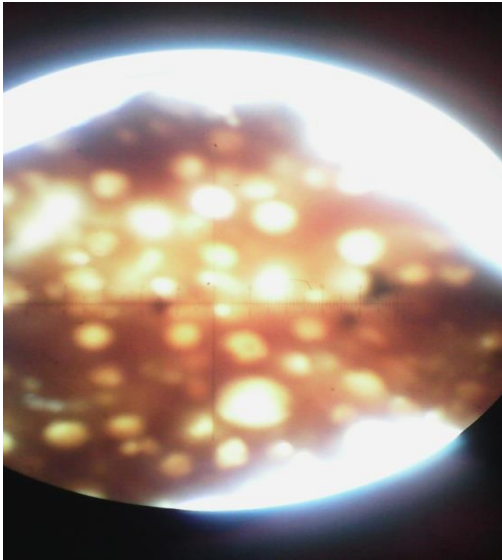
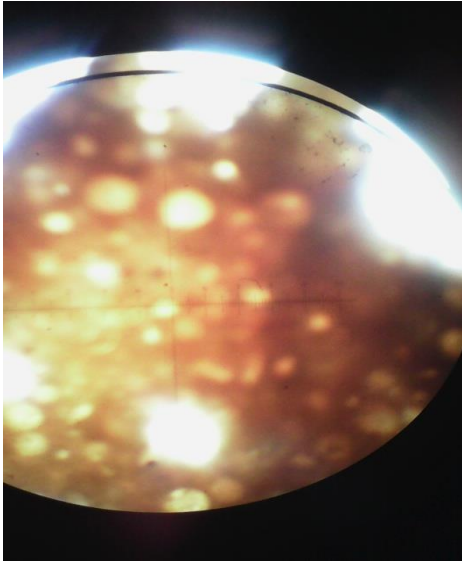
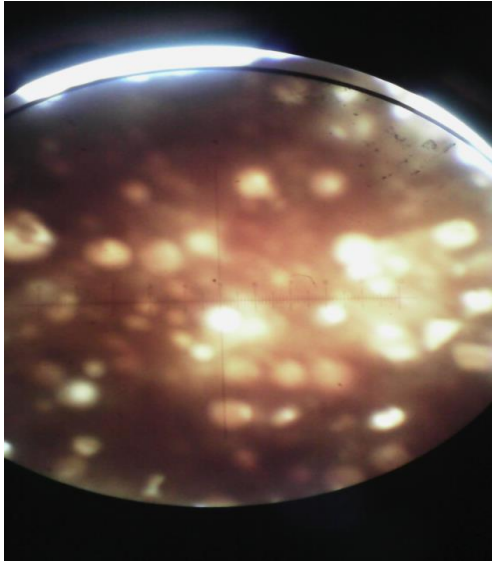


Fuente: segunda fase del procedimiento experimental, realizada en el Laboratorio de Microbiología de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

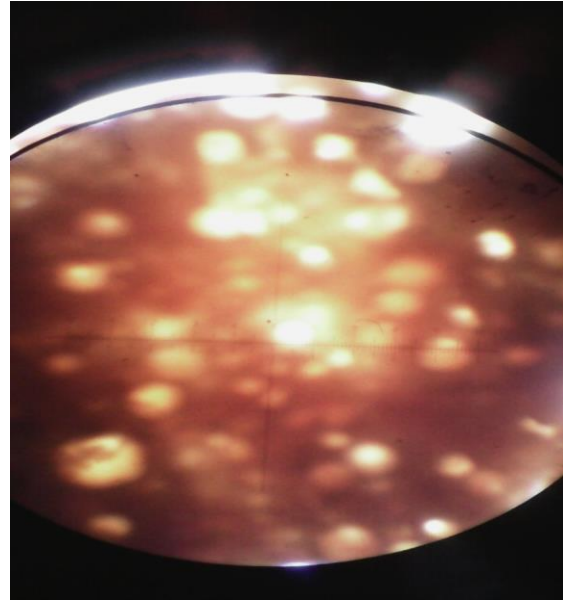
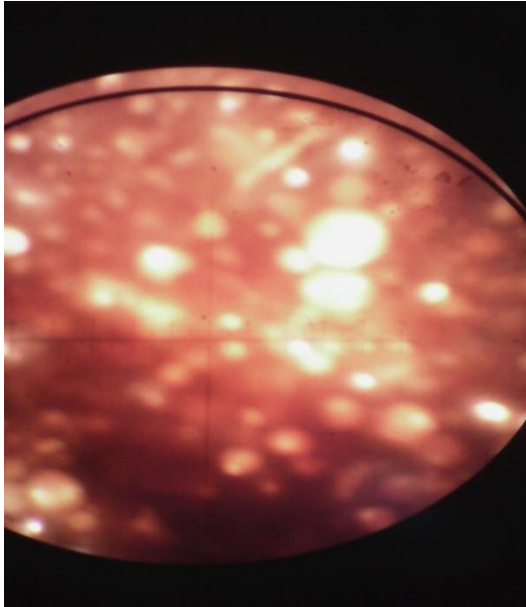
Figura 30. **Fotografías de la prueba 12, primera corrida**



Continuación del apéndice 6, figura 30.

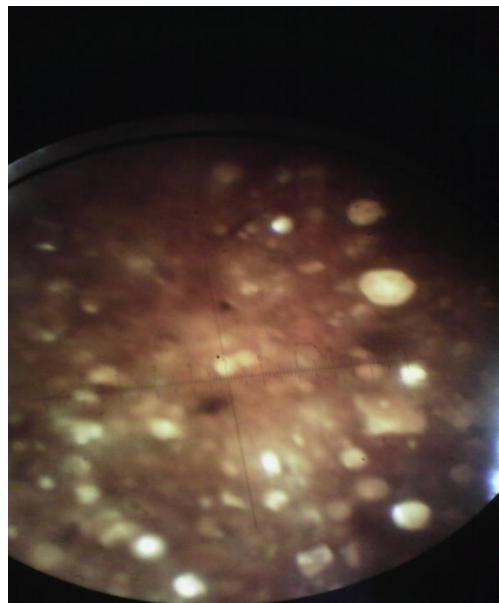
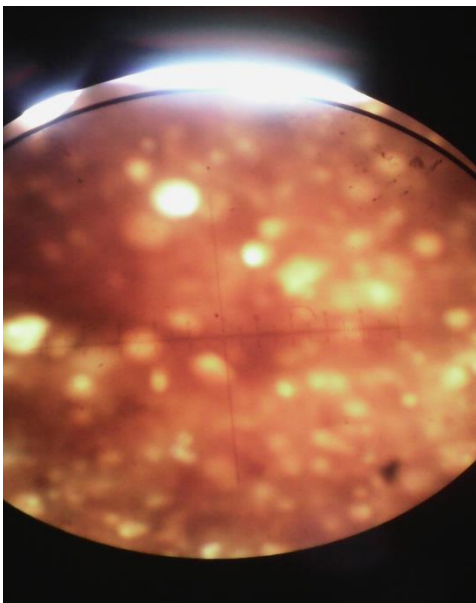
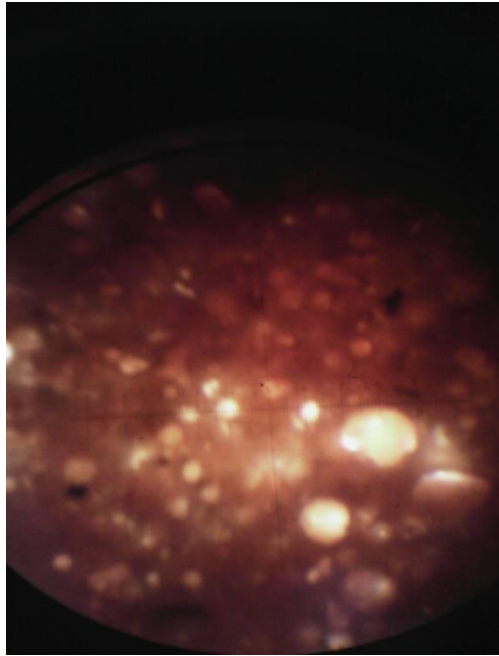
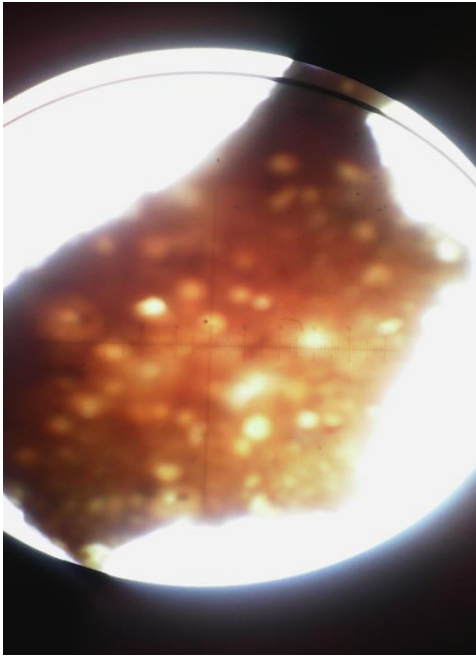


Continuación del apéndice 6, figura 30.

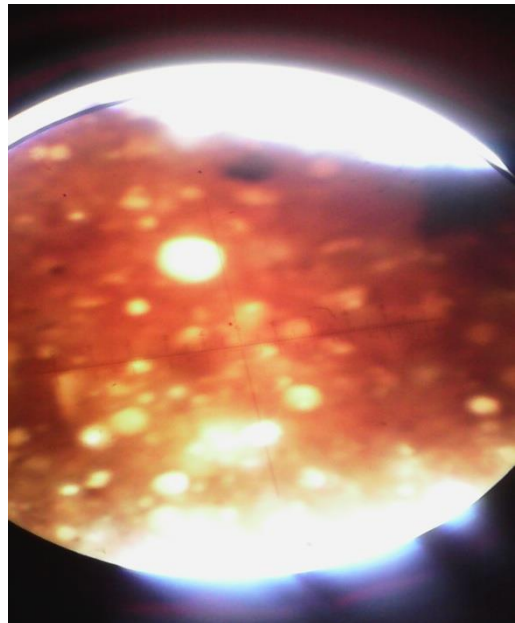
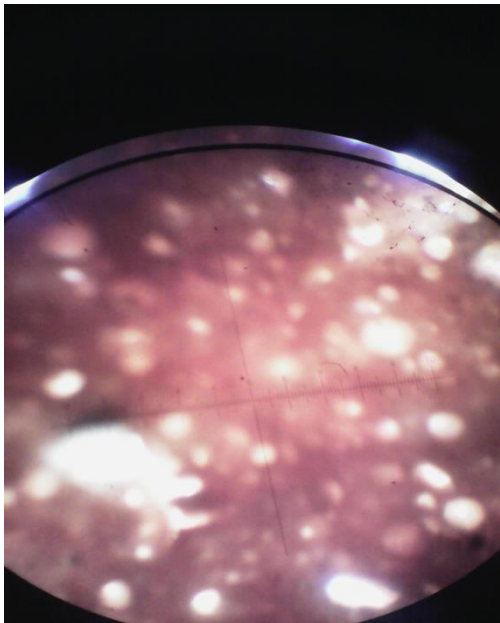
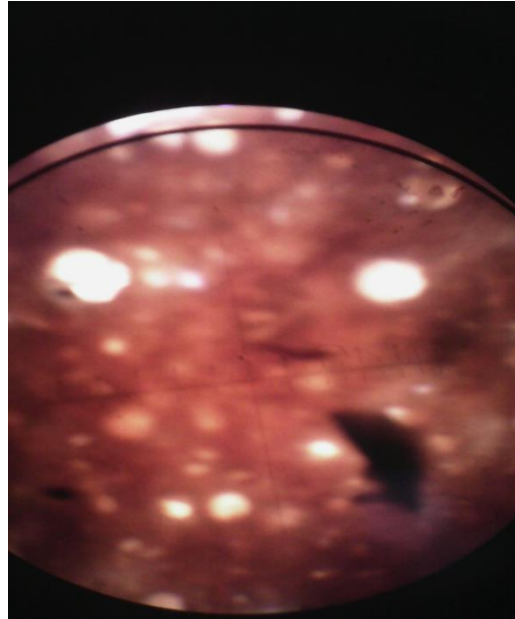
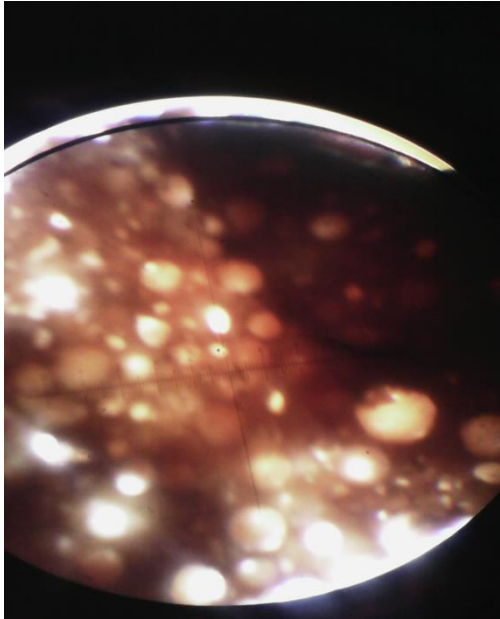


Fuente: segunda fase del procedimiento experimental, realizada en el Laboratorio de Microbiología de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

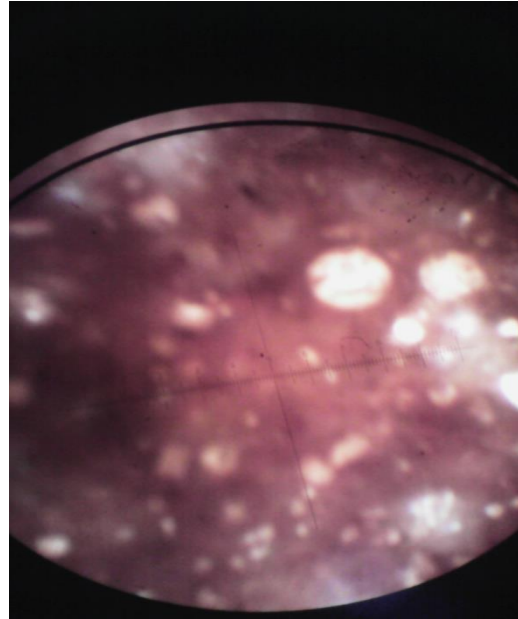
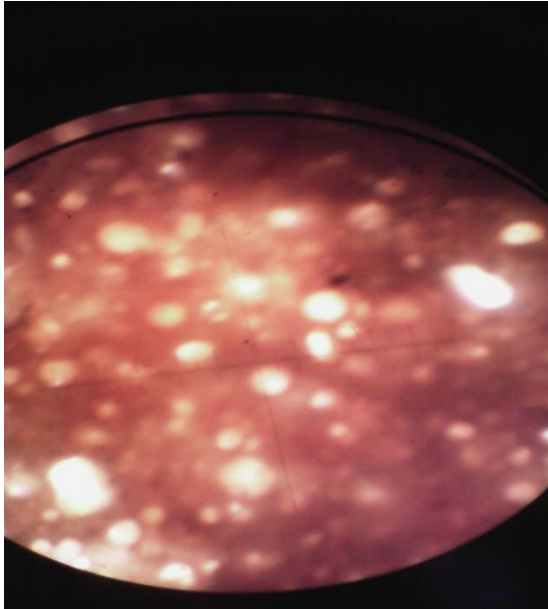
Figura 31. Fotografías de la prueba 12, segunda corrida



Continuación del apéndice 6, figura 31.



Continuación del apéndice 6, figura 31.



Fuente: segunda fase del procedimiento experimental, realizada en el Laboratorio de Microbiología de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

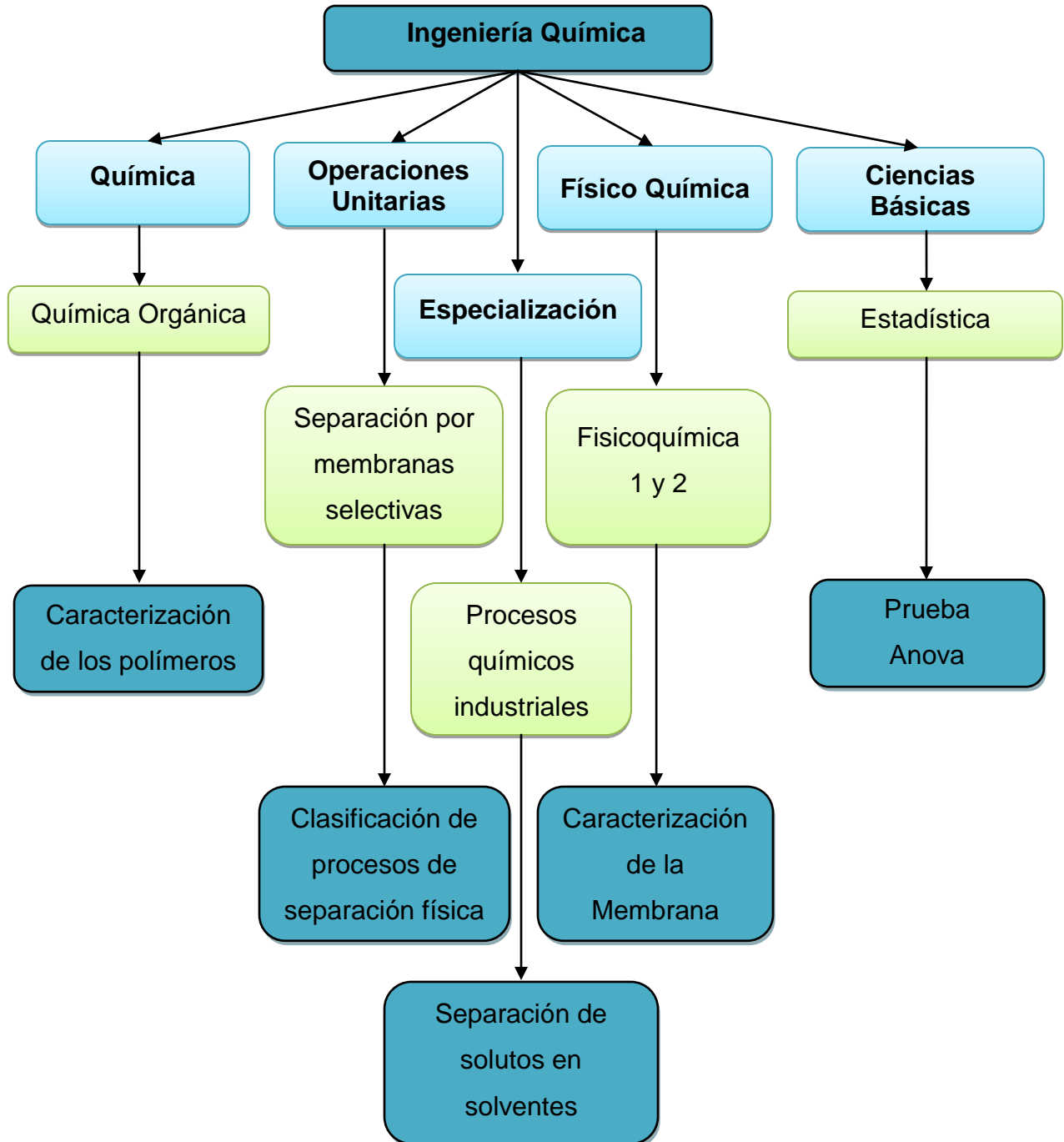
Apéndice 7. **Costo del proyecto de investigación**

Detalle	Cantidad	Costo (Quetzales)
Materia prima		
Tereftalato de polietileno (PET)	50 libras	207,50
Papel aluminio	3 rollos	21,50
Cloruro de sodio refinado	3 libras	3,00
Cristalería		
Micrómetro objetivo	1	175,00
Micrómetro ocular	1	225,00
Vaso de precipitación de 25 ml	1	25,00
Porta objetos	5	10,00
Cuchilla y navajas	2	15,25
Recipientes de metal para preparar las membranas	2	75,50
total		757,75

Fuente: elaboración propia.

APÉNDICE 8

Diagrama de Requisitos Académicos



APÉNDICE 9

Diagrama de Ishikawa

